

BETINA LEPRETTI MEDEIROS

**ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS DE CONCRETO: LEVANTAMENTO DE
MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NA REGIÃO METROPOLITANA DE
CURITIBA E ANÁLISE DE SISTEMAS DE REPARO**

**Dissertação apresentada como requisito
parcial à obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil, Programa de Pós-
Graduação em Construção Civil, Setor de
Tecnologia, Universidade Federal do
Paraná.**

**Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio
Marino**

**CURITIBA
2005**

**Só é incapaz aquele que
não é capaz de tentar.**

**À querida Tia Nirlei
(In Memoriam)**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

Ao Prof. Marino, pela sua amizade e por ter me aceito como orientada desde o início, ajudando e estimulando a finalização da dissertação nas horas mais difíceis.

À Patrícia, pela amizade de irmã, por incentivar a minha entrada ao PPGCC e por acreditar na minha capacidade. Sem sua ajuda e conhecimento este trabalho não seria possível.

Ao Prof. Chamecki, a quem admiro. Obrigada pela confiança depositada e apoio em diversos momentos.

Aos meus pais, Winston e Tamar, exemplos de amor incondicional, privação e dedicação integral. Jamais poderei expressar toda minha gratidão!

Aos meus amados avós, Edison e Maria José, pelo carinho e ajuda durante minha formação profissional realizada no Brasil.

Aos meus irmãos, Andrea e Fabrício, o que posso dizer... Amo vocês!

Ao Oscar, por ser o solícito “cunhado-irmão”.

Aos meus queridos sobrinhos Renato, Fernanda e Maria Francisca, razão do meu viver.

Às minhas queridas tias, Rejane, Denise e Tânia, e tios, Armando, Juarez e Caco, primas; Raphaella, Manoela, Camila, Renata e ao primo Tica pela força durante todos estes anos. Muito obrigada!

Ao LACTEC, pela disponibilidade dos laboratórios e recursos financeiros para esta pesquisa.

À COPEL, por acompanhar nossas visitas, sempre com uma equipe técnica fantástica.

À Waleska “filhinha querida”, por ajudar nas visitas, dosagens, ensaios e correções, e por ser esta pessoa linda e maravilhosa.

À Regiane “Jéssica”, por desempenhar carinhosamente o papel de “filhinha querida” em diversas ocasiões. Adoro você.

À Aline “Fofote”, pela ajuda nos momentos em que precisava e principalmente, por sua amizade verdadeira. Obrigada por seu apoio logístico.

Aos meninos, Marcos “Joselito”, Altair, Tiago e Sandro por ajudarem com todo seu esforço contribuindo para este trabalho. Valeu pela força!

Aos pesquisadores do LAME, Betinha “chefinha querida”, Eduardo, Roberta, Alkimin, Alessander, Laryssa, e Douglas por contribuírem no meu crescimento.

Ao Prof. Kleber, por todo seu conhecimento e pela eterna disposição em colaborar.

Aos meus amigos e colegas do LAME, Rosane, Cibele, Alan, Marcelo, Joãozinho, Amauri, Eustáquio, Marciele, Anivo, Marcos, Edimilton, Vilma, Cris, Valdevan, Paulo, Plínio, Thomas, Fabiano, Mardon, Vander, Anderson e Lica, por acompanharem durante o período de desenvolvimento da dissertação.

Ao pessoal do NORIE, Aguida, Lucília, Denise, Ângela e Cris pela recepção na UFRGS e por contribuírem no conhecimento de diversos ensaios.

Ao Prof. Paulon, Sandrão e Fabrício pelas divertidas conversas, que muito contribuíram à minha estabilidade emocional durante este processo.

Aos professores da UFPR, Scheer, Ricardo, Mauro, Freitas, Aguinaldo, Dalledone, Ney e José Marques, pelo enriquecimento ao longo das aulas de graduação, especialização e mestrado.

Ao querido Fritz, por ajudar a espairecer e pela agradável companhia durante as noites em claro.

Ao Léo, por seu carinho, apoio e paciência.

A todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente neste trabalho... Apesar da falta de espaço nos agradecimentos, muito obrigada a todos...

“Escrever é fácil. Você começa com uma letra maiúscula e termina com um ponto final, no meio você coloca as idéias.”

Pablo Neruda

SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS E TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	1
1.2 HIPÓTESES	1
1.3 JUSTIFICATIVAS	2
1.4 LIMITAÇÕES	3
1.5 CONTEÚDO	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	6
2.2 ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS DE CONCRETO ARMADO	8
2.3 AMBIENTE AGRESSIVO	9
2.4 PERMEABILIDADE DO CONCRETO	11
2.5 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS	12
2.6 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO ARMADO	14
2.6.1 Fissuras	16
2.6.2 Eflorescências	17
2.6.3 Ataque por Sulfatos	18
2.6.4 Reação Álcali-Agregado	19
2.6.5 Corrosão de Armaduras	21
2.6.5.1 Ataque por Cloretos	25
2.6.5.2 Carbonatação	26
2.7 INSPEÇÕES E CADASTRO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS	28
2.8 ENSAIOS DE TESTEMUNHOS	31
2.9 MICROSCOPIA	32
2.10 SISTEMAS DE REPAROS	34
2.11 ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES	37
2.12 SÍLICA ATIVA	38
2.13 INIBIDORES DE CORROSÃO	39
2.14 POLÍMEROS	40
2.15 ARGAMASSAS E GRAUTES COMERCIAIS	41
2.15.1 Argamassas Poliméricas	41
2.15.2 Argamassas Orgânicas	42
2.15.3 Argamassas à Base Epóxi	42
2.15.4 Argamassas à Base Fenólica	42
2.15.5 Argamassas à Base de Poliéster	43
2.15.6 Argamassas à Base Furânica	43
2.15.7 Grautes à Base de Cimento	43
3 LEVANTAMENTO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS	44
3.1 CÂMARAS E CAIXAS DE PASSAGEM DE REDE ELÉTRICA	44
3.2 INSPEÇÃO E CADASTRO	49
3.3 COLETA DE AMOSTRAS	52
3.4 ANÁLISE DE AMOSTRAS	55
3.4.1 Água	55
3.4.2 Solo	57
3.4.3 Concreto	58

3.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES DE TESTEMUNHOS	61
3.6	PRINCIPAIS MANIFESTAÇÕES DE CÂMARAS E CAIXAS	64
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	70
4.1	OBJETIVO	70
4.2	MATERIAIS UTILIZADOS	72
4.2.1	Cimento	72
4.2.2	Agregado Miúdo	73
4.2.3	Sílica Ativa	74
4.2.4	Nitrito de Sódio	76
4.2.5	Estireno-Butadieno	76
4.2.6	Aditivo	76
4.2.7	Água de Amassamento	76
4.2.8	Argamassas Comerciais	76
4.3	TRAÇOS	78
4.4	CORPOS-DE-PROVA	80
4.5	DOSAGENS	81
4.6	ENSAIOS	82
4.6.1	Resistência à Compressão Axial	83
4.6.2	Ensaio de Resistência à Tração na Flexão	83
4.6.3	Absorção por Sucção Capilar – Absortividade	84
4.6.4	Absorção por Imersão	87
4.6.5	Absorção por Capilaridade	88
4.6.6	Microscopia Eletrônica de Varredura	90
5	RESULTADOS	91
5.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	91
5.1.1	Argamassas com Adições	91
5.1.2	Argamassas Comerciais	95
5.1.3	Comparação entre Resultados Finais de Resistência à Compressão Axial	96
5.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	97
5.2.1	Argamassas com Adições	97
5.2.2	Argamassas Comerciais	98
5.2.3	Comparação entre Resultados Finais de Resistência à Tração na Flexão	99
5.3	ABSORÇÃO POR SUCÇÃO CAPILAR - ABSORTIVIDADE	99
5.3.1	Argamassas com Adições	99
5.3.2	Argamassas Comerciais	100
5.3.3	Comparação entre Resultados Finais de Sucção Capilar	103
5.4	ABSORÇÃO POR IMERSÃO	103
5.4.1	Argamassas com Adições	103
5.4.2	Argamassas Comerciais	105
5.4.3	Comparação entre Resultados Finais de Absorção por Imersão	106
5.5	ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	106
5.5.1	Argamassas com Adições	106
5.5.2	Argamassas Comerciais	108
5.5.3	Comparação entre Resultados Finais de Absorção por Capilaridade	108
5.6	MICROSCÓPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	108
6	CUSTOS	112
6.1	VOLUME DE MATERIAL	112
6.2	PREÇOS DOS MATERIAIS	112
6.3	ARGAMASSAS COM ADIÇÕES	113
6.4	ARGAMASSAS COMERCIAIS	115
6.5	RESULTADOS	115
6.5.1	Argamassas com Adições	115
6.5.2	Argamassas Comerciais	117
6.6	AValiação FINAL	118

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
7.1 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM CÂMARAS E CAIXAS.....	119
7.2 SISTEMAS DE REPAROS.....	120
7.2.1 Ensaio de Resistência à Compressão Axial	121
7.2.2 Ensaio de Resistência à Tração na Flexão.....	121
7.2.3 Ensaio de Absorção por Sucção Capilar – Absortividade.....	122
7.2.4 Ensaio de Absorção por Imersão	122
7.2.5 Ensaio de Absorção por Capilaridade.....	122
7.2.6 Conclusão.....	122
7.3 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	123
BIBLIOGRAFIA.....	125
APÊNDICE A.....	129
APÊNDICE B.....	140
APÊNDICE C.....	147
APÊNDICE D.....	151
APÊNDICE E.....	154
APÊNDICE F.....	167
APÊNDICE G.....	170
APÊNDICE H.....	174
APÊNDICE I.....	177
APÊNDICE J.....	181
APÊNDICE K.....	184
APÊNDICE L.....	186

LISTA DE QUADROS E TABELAS

QUADRO 1 - CAUSAS NATURAIS DE DETERIORAÇÕES (SOUZA E RIPPER, 1998)	14
QUADRO 2 - MANIFESTAÇÕES NAS CÂMARAS.....	65
QUADRO 3 - MANIFESTAÇÕES NAS CAIXAS	66
TABELA 1 - POLUENTES ATMOSFÉRICOS DE CURITIBA (PARANÁ, 2001).....	10
TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DA AGRESSIVIDADE DA ÁGUA (NEVILLE, 1997).....	13
TABELA 3 - RESOLUÇÃO DOS EQUIPAMENTOS (PADILHA E AMBROZIO, 1985)	32
TABELA 4 - REQUISITOS PARA A ÁGUA DE AMASSAMENTO (NBR 6118/03).....	37
TABELA 5 - RESULTADOS DA ANÁLISE DA ÁGUA NAS 10 CÂMARAS	55
TABELA 6 - RESULTADOS DA ANÁLISE DA ÁGUA NAS 10 CAIXAS	56
TABELA 7 - GRAU DE AGRESSIVIDADE, FUNÇÃO DO PH E SO ₃ (BAUER, 1994)	56
TABELA 8 - TEORES (%) QUÍMICOS DOS SOLOS I.....	57
TABELA 9 - TEORES (%) QUÍMICOS DOS SOLOS II.....	58
TABELA 10 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RC DE TESTEMUNHOS DE CONCRETO	63
TABELA 11 - CLASSIFICAÇÃO DE ESTRUTURAS (NBR 6118/03).....	68
TABELA 12 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS CIMENTOS	72
TABELA 13 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS CIMENTOS.....	72
TABELA 14 - RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DOS CIMENTOS.....	73
TABELA 15 - GRANULOMETRIA AGREGADO MIÚDO	73
TABELA 16 - CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO	74
TABELA 17 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA SA.....	74
TABELA 18 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA SA.....	75
TABELA 19 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS COMERCIAIS.....	78
TABELA 20 - TRAÇO PARA ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE SA	78
TABELA 21 - TRAÇO PARA ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE NS.....	78
TABELA 22 - TRAÇO PARA ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE EB.....	79
TABELA 23 - TRAÇO CORRESPONDENTE A CADA ARGAMASSA COMERCIAL.....	79
TABELA 24 - ARGAMASSA COM ADIÇÃO SA A 10%	79
TABELA 25 - ARGAMASSA COM ADIÇÃO NS A 2%.....	79
TABELA 26 - ARGAMASSA COM ADIÇÃO EB A 20%	80
TABELA 27 - QUANTIDADE DE CORPOS-DE-PROVA	80
TABELA 28 - REPETIÇÕES DOS TRAÇOS.....	81
TABELA 29 - PREÇO UNITÁRIO DOS MATERIAIS	112
TABELA 30 - QUANTIDADE MÉDIA DE ADITIVO PARA ADIÇÃO SA.....	113
TABELA 31 - QUANTIDADE MÉDIA DE ADITIVO PARA ADIÇÃO NS	113
TABELA 32 - QUANTIDADE MÉDIA DE ADITIVO PARA ADIÇÃO EB.....	113
TABELA 33 - CUSTO DOS COMPONENTES DA ARGAMASSA COM SA EM R\$/M ³	114
TABELA 34 - CUSTO DOS COMPONENTES DA ARGAMASSA COM NS EM R\$/M ³	114
TABELA 35 - CUSTO DOS COMPONENTES DA ARGAMASSA COM EB EM R\$/M ³	114
TABELA 36 - CUSTO POR TRAÇO DE ARGAMASSA COMERCIAL EM R\$/M ³	115

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - EFLORESCÊNCIA ENCONTRADA NA TAMPA DE CÂMARA SUBTERRÂNEA.....	18
FIGURA 2 - REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA (PAULON (1981) APUD SABBAG, 2003).....	20
FIGURA 3 - CORROSÃO DE ARMADURA (AHMAD, 2003).....	23
FIGURA 4 - CLASSIFICAÇÃO DE CORROSÃO (CASCUDO, 1997)	24
FIGURA 5 - CORROSÃO DE ARMADURA DEVIDO À CARBONATAÇÃO	24
FIGURA 6 - OCORRÊNCIA DE FORMAS DE ÍONS NO CONCRETO (CASCUDO, 1997)	26
FIGURA 7 - CARBONATAÇÃO DO CONCRETO ARMADO (ANDRADE, 1992)	28
FIGURA 8 - INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS COM CORROSÃO (ANDRADE, 1992)	30
FIGURA 9 - RUPTURA DE TESTEMUNHO	32
FIGURA 10 - PORO FORMADO EM ARGAMASSA DE REPARO	33
FIGURA 11 - PATOLOGIAS DAS CÂMARAS TRANSFORMADORAS (BARBOSA, 2004)	35
FIGURA 12 - EFEITO <i>FILLER</i> QUE OCORRE NA SÍLICA ATIVA (AÏTCIN, 2000).....	38
FIGURA 13 - REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - COPEL.....	45
FIGURA 14 - ESTRUTURA DA CÂMARA - COPEL	45
FIGURA 15 - ACESSO À CÂMARA	46
FIGURA 16 - ESTRUTURA DA CAIXA PERFIL - COPEL	46
FIGURA 17 - ESTRUTURA DA CAIXA PLANTA - COPEL	47
FIGURA 18 - ACESSO À CAIXA.....	47
FIGURA 19 - MANIFESTAÇÕES EM CÂMARAS.....	51
FIGURA 20 - MANIFESTAÇÕES EM CAIXAS	52
FIGURA 21 - OBTENÇÃO DE AMOSTRA DE CONCRETO	52
FIGURA 22 - INDICADOR DE PH DO CONCRETO	53
FIGURA 23 - EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHO	53
FIGURA 24 - SOLO ENCONTRADO APÓS RETIRADA DE TESTEMUNHO	54
FIGURA 25 - MODELO DE ETIQUETA PARA AMOSTRA DE CONCRETO DE VIGAS.....	55
FIGURA 26 - CRISTAIS DE ETRINGITA E HIDRÓXIDO DE CÁLCIO EM TESTEMUNHO	59
FIGURA 27 - ESPECTRÔMETRO FIG. 26, PONTO 1 – ALTA CONCENTRAÇÃO DE CÁLCIO.....	59
FIGURA 28 - ETRINGITA EM AMOSTRA DE TESTEMUNHO	59
FIGURA 29 - ESPECTRÔMETRO FIG. 28, PONTO 1 – ALTA CONCENTRAÇÃO DE CÁLCIO.....	60
FIGURA 30 - FORMAÇÃO DE CRISTAIS DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO EM TESTEMUNHO.....	60
FIGURA 31 - ESPECTRÔMETRO FIG. 30, PONTO 1 – ALTA CONCENTRAÇÃO DE CÁLCIO.....	60
FIGURA 32 - CPS COM ALTURAS DIFERENTES.....	61
FIGURA 33 - PRINCIPAIS MANIFESTAÇÕES EM CÂMARAS	67
FIGURA 34 - PRINCIPAIS MANIFESTAÇÕES EM CAIXAS	67
FIGURA 35 - ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA.....	71
FIGURA 36 - CURVA GRANULOMÉTRICA DA AREIA	74
FIGURA 37 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA SA	75
FIGURA 38 - MOLDES CILÍNDRICOS E PRISMÁTICOS	80
FIGURA 39 - MESA PARA ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	82
FIGURA 40 - TRONCO DE CONE.....	82
FIGURA 41 - GOLPES COM O SOQUETE	82
FIGURA 42 - RETIRADA DO CONE	82
FIGURA 43 - INÍCIO DO ABATIMENTO	82
FIGURA 44 - FIM DO ABATIMENTO	82
FIGURA 45 - CAPEAMENTO E RUPTURA DE CP	83
FIGURA 46 - ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO	84
FIGURA 47 - APLICAÇÃO DE RESINA EPÓXI NAS LATERAIS DO CP	85
FIGURA 48 - ACOPLÉ DE SISTEMA CÂNULA E PVC COM POLIURETANO	86
FIGURA 49 - PASSAGEM DE ÁGUA PELOS CAPILARES DA ARGAMASSA	86
FIGURA 50 - AMOSTRA VEDADA NAS LATERAIS E TOPO.....	86
FIGURA 51 - ESPESSURA DA LÂMINA DE ÁGUA SOBRE O TOPO DO CP	86
FIGURA 52 - AMOSTRAS AGUARDANDO PESAGEM NA BALANÇA.....	87
FIGURA 53 - AMOSTRA SENDO PESADA.....	87
FIGURA 54 - 1/3 DE ÁGUA.....	88

FIGURA 55 - 2/3 DE ÁGUA.....	88
FIGURA 56 - IMERSO EM ÁGUA	88
FIGURA 57 - PESAGEM	88
FIGURA 58 - IMERSÃO	88
FIGURA 59 - FERVURA.....	88
FIGURA 60 - CPS EM ENSAIO DE IMERSÃO.....	89
FIGURA 61 - LÂMINA DE ÁGUA DE 5 MM SOB A BASE DO CP	89
FIGURA 62 - TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	90
FIGURA 63 - LEITURA DE CAMINHO DE CAPILARES	90
FIGURA 64 - ABSORÇÃO CAPILAR	90
FIGURA 65 - ALTURAS DA ASCENSÃO CAPILAR.....	90
FIGURA 66 - RC – ARGAMASSAS COM SA – A/C 0,45	91
FIGURA 67 - RC – ARGAMASSAS COM SA – A/C 0,50	92
FIGURA 68 - RC – ARGAMASSAS COM SA – A/C 0,55	92
FIGURA 69 - RC – ARGAMASSAS COM NS – A/C 0,45	93
FIGURA 70 - RC – ARGAMASSAS COM NS – A/C 0,50	93
FIGURA 71 - RC – ARGAMASSAS COM NS – A/C 0,55	93
FIGURA 72 - RC – ARGAMASSAS COM EB – A/C 0,45	94
FIGURA 73 - RC – ARGAMASSAS COM EB – A/C 0,50	94
FIGURA 74 - RC – ARGAMASSAS COM EB – A/C 0,55	95
FIGURA 75 - RC – ARGAMASSAS COMERCIAIS.....	96
FIGURA 76 - RTF – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,45.....	97
FIGURA 77 - RTF – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,50.....	97
FIGURA 78 - RTF – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,55.....	98
FIGURA 79 - RTF – ARGAMASSAS COMERCIAIS.....	98
FIGURA 80 - RCAP – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,45.....	99
FIGURA 81 - RCAP – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,50.....	100
FIGURA 82 - RCAP – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,55.....	100
FIGURA 83 - RCAP – ARGAMASSAS COMERCIAIS.....	101
FIGURA 84 - ARGAMASSA ÚMIDA TIPO 2 E ARGAMASSA SECA TIPO 7	101
FIGURA 85 - TA – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,45	102
FIGURA 86 - TA – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,50	102
FIGURA 87 - TA – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,55	102
FIGURA 88 - TA – ARGAMASSAS COMERCIAIS	103
FIGURA 89 - COEFICIENTE DE AI – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,45.....	104
FIGURA 90 - COEFICIENTE DE AI – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES - A/C 0,50.....	104
FIGURA 91 - COEFICIENTE DE AI – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES - A/C 0,55.....	104
FIGURA 92 - COEFICIENTE DE AI – ARGAMASSAS COMERCIAIS.....	105
FIGURA 93 - TAXA APC – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,45	106
FIGURA 94 - TAXA APC – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,50	107
FIGURA 95 - TAXA APC – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,55	107
FIGURA 96 - TAXA DE APC – ARGAMASSAS COMERCIAIS.....	108
FIGURA 97 - PORO COM HIDRÓXIDO DE CÁLCIO EM ARGAMASSA COM EB	109
FIGURA 98 - ESPECTRÔMETRO FIG. 97, PONTO 3 – ALTA CONCENTRAÇÃO DE CÁLCIO.....	109
FIGURA 99 - HIDRÓXIDO DE CÁLCIO EM ARGAMASSA COM EB	110
FIGURA 100 - ESPECTRÔMETRO FIG. 99, PONTO 1 – ALTA CONCENTRAÇÃO DE CÁLCIO....	110
FIGURA 101 - CRISTAIS DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO EM ARGAMASSA COM EB.....	110
FIGURA 102 - CUSTO EM R\$/M ³ – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,45.....	116
FIGURA 103 - CUSTO EM R\$/M ³ – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,50.....	116
FIGURA 104 - CUSTO EM R\$/M ³ – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,55.....	116
FIGURA 105 - CUSTO EM R\$/M ³ – ARGAMASSAS COMERCIAIS.....	117

LISTAS DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Ø – DIÂMETRO
a/c – ÁGUA / CIMENTO
AI – ABSORÇÃO POR IMERSÃO
AL₂O₃ – ÓXIDO DE ALUMÍNIO
ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA
APC – ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE
ARI – ALTA RESISTÊNCIA INICIAL
C₂S – SILICATO DICÁLCICO
C₃A – ALUMINATO TRICÁLCICO
Ca²⁺ – ÍON CÁLCIO
Ca(OH)₂ – HIDRÓXIDO DE CÁLCIO
CaCl₂ – CLORETO DE CÁLCIO
CaCO₃ – CARBONATO DE CÁLCIO
CaO – ÓXIDO DE CÁLCIO
CaSO₄ – SULFATO DE CÁLCIO
CH – FASE HIDRATADA DO Ca(OH)₂
Cl⁻ – ÍON CLORETO
CO – MONÓXIDO DE CARBONO
CO₂ – DIÓXIDO DE CARBONO; GÁS CARBÔNICO
CONS. – CONSISTÊNCIA
COPEL – COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA
CP – CORPO-DE-PROVA
CP xx – CIMENTO PORTLAND TIPO xx
CPs – CORPOS-DE-PROVA
CSH – SILICATO DE CÁLCIO HIDRATADO
CV – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
EB – ESTIRENO-BUTADIENO
EDS – ESPECTROMETRIA POR ENERGIA DISPERSIVA
EQUIV. ALC. – EQUIVALENTE ALCALINO
EXP. – EXPANSIBILIDADE
f_{ck} – RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA
Fe₂O – ÓXIDO DE FERRO
H₂O – ÁGUA
h/d – RELAÇÃO ALTURA / DIÂMETRO
K₂O – ÓXIDO DE POTÁSSIO
KOH – HIDRÓXIDO DE POTÁSSIO
LACTEC – INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO
MEV – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA
MgO – ÓXIDO DE MAGNÉSIO
MgSO₄ – SULFATO DE MAGNÉSIO
MnO – ÓXIDO DE MANGANÊS
Na⁺ – ÍON SÓDIO
Na₂O – ÓXIDO DE SÓDIO
NaCl – CLORETO DE SÓDIO
NaNO₂ – NITRITO DE SÓDIO
NaSO₄ – SULFATO DE SÓDIO
NBR – NORMA BRASILEIRA
NM – NORMA MERCOSUL
NO – MONÓXIDO DE NITROGÊNIO
NO₂ – DIÓXIDO DE NITROGÊNIO
NS – NITRITO DE SÓDIO
O₂ – OXIGÊNIO

P_2O_5 – PENTÓXIDO DE FÓSFORO
P & D – PESQUISA E DESENVOLVIMENTO
pH – POTENCIAL HIDROGENIÔNICO
RAA – REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO
RC – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL
RCAP – RESISTÊNCIA CAPILAR
RES. INSOL – RESÍDUO INSOLÚVEL
RTF – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO
S – DESVIO-PADRÃO
SA – SÍLICA ATIVA
SBR – ESTIRENO-BUTADIENO
 SiO_2 – ÓXIDO DE SILÍCIO
 SO_2 – DIÓXIDO DE ENXOFRE
 SO_3 – TRIÓXIDO DE ENXOFRE
 SO_4^- – ÍON SULFATO
TA – TAXA DE ABSORÇÃO
 TiO_2 – ÓXIDO DE TITÂNIO

RESUMO

Diversas são as causas que afetam a durabilidade de estruturas subterrâneas de concreto, sendo possível citar como as principais: corrosão da armadura, carbonatação e fissuras em geral. Tais manifestações patológicas são causadas pelo ambiente agressivo em que se encontram que aliadas a problemas de vibrações de projeto ou de execução, resultam na deterioração das câmaras e caixas de passagem da rede elétrica. Para resistir a este ambiente, os sistemas de reparos devem apresentar durabilidade adequada, resistência a temperaturas elevadas, reagir à presença de umidade e infiltração de gases e líquidos contaminados, bem como alta resistência mecânica nas primeiras idades para acelerar os serviços de manutenção. Por meio de ensaios de absorção por capilaridade, absorção por imersão, absorvidade, ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão e microscopia eletrônica de varredura foram analisados diferentes tipos de argamassas de reparos. Para isto, foram utilizados quatro tipos de cimento com diferentes relações água/cimento, aditivo e adições químicas e mineral, além de sete tipos de argamassas comerciais. A avaliação de desempenho do material, obtida a partir dos dados de laboratório, indicou o Cimento Portland CP IV - 32, combinado com sílica ativa e relação água/cimento de 0,45, como o material menos permeável, de custo moderado, mais resistente e durável, tornando-o potencialmente mais adequado ao reparo e recuperação de tais estruturas. Dentre as argamassas comerciais, a argamassa Tipo 4 (grau não-retrátil) e Tipo 6 (argamassa polimérica) resultaram as mais indicadas.

ABSTRACT

There are several causes that affect the durability of concrete underground structures, among which the main ones are: corrosion of the steel reinforcing bars, carbonation and cracks in general. Such pathological state derives from the aggressive environment in which the structures are built, causing quick deterioration in chambers, tunnels, boxes and other common units of electricity distribution systems in the subsoil. In order to overcome this situation, repair materials and techniques must show adequate durability, strength to high temperatures, resistance to the presence of humidity and contaminated gases and liquids, as well as mechanical strength at early ages, to accelerate repair services.

A few different repair mortars were utilized for this objective, and tests such as absorption by capillarity, absorption by immersion, unconfined compression, tension under bending and electronic microscopy were carried out. Four types of cement with varying water cement ratio, additives and chemical/mineral addition were studied, besides seven kinds of commercially available mortars.

The performance analysis of the materials from the tests results indicated the CP IV 32 Portland cement, combined with active silica and water cement ratio equal to 0.45, as the least permeable at a reasonable cost, becoming the potentially indicated one for concrete structural repairs. Among the mortars, type 4 grout and type 6 (polymeric based) showed the best behavior.

1 INTRODUÇÃO

Esta dissertação foi realizada em virtude do projeto “Seleção de Sistemas de Reparo para Estruturas de Concreto de Câmaras e Caixas de Passagem de Redes Subterrâneas de Energia Elétrica de Curitiba”, desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, e vinculado ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com o Programa de Pós-Graduação em Construção Civil.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desta dissertação é determinar as principais causas da redução da durabilidade do concreto das estruturas de câmaras e caixas subterrâneas utilizadas na região metropolitana de Curitiba, bem como desenvolver sistemas de reparos em função da durabilidade e do custo.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- levantar as manifestações patológicas nas câmaras e caixas subterrâneas;
- avaliar o desempenho mecânico e a durabilidade de reparos com diferentes argamassas e adições;
- avaliar o desempenho mecânico e a durabilidade de reparos com argamassas comerciais;
- determinar a argamassa com melhor desempenho gente as características de durabilidade e desempenho mecânico.

1.2 HIPÓTESES

As principais causas que reduzem a durabilidade de estruturas de concreto armado de câmaras e caixas subterrâneas são fissuras, corrosão, eflorescências e

destacamento de material de revestimento e cobrimento. Manifestações patológicas como estas são influenciadas pela agressividade do meio ambiente, qualidade dos materiais utilizados e erros de execução.

Baseados em estudos, as argamassas com adição de sílica ativa (SA) devem apresentar incrementos de resistência e menor permeabilidade.

Entre as argamassas comerciais, o fabricante destaca o desempenho mecânico da argamassa Tipo 1 (graute à base de cimento), de elevada resistência inicial e final.

1.3 JUSTIFICATIVAS

Conforme MEHTA e MONTEIRO (1994), o concreto apresenta desempenho satisfatório quando comparado a outros materiais de construção civil. Entretanto, as estruturas podem sofrer deteriorações durante a vida útil, influenciadas por problemas patológicos, os quais são causados principalmente pela agressividade do meio no qual estão inseridas tais estruturas.

Tratando-se de obras subterrâneas, destaca-se a agressividade do meio imposto pela presença de ar, água, solos e outros fatores, que por processos químicos e físicos resultam em degradações do concreto como ataque por ácidos, sulfatos, carbonatação e corrosão (ABREU, 1998).

Nas referências bibliográficas nacionais e internacionais não se encontram estudos específicos sobre degradações de câmaras e caixas subterrâneas destinadas à distribuição e passagem de rede de energia elétrica. Algumas avaliações realizadas por meio de levantamentos de patologias por ARANHA (1994) e DAL MOLIN (1988), mostraram as possíveis causas dos danos em edificações subterrâneas.

Segundo CABRAL (2000), a corrosão de armaduras apresenta-se como a principal causa de danos em estruturas de concreto armado desencadeada pela

ação de cloretos e carbonatação em conjunto com a presença da umidade e do oxigênio do ar atmosférico. KULAKOWSKI (2002) aponta a porosidade como um item fundamental a ser estudado, associado à presença do dióxido de carbono (CO_2) para propagação da carbonatação do concreto.

A corrosão, comum em estruturas subterrâneas, pode ser verificada em câmaras e caixas subterrâneas de grandes cidades. Em situações similares de exposição a agentes agressivos encontram-se túneis de metrô, canais de esgoto e sistemas de captação de água entre outros (PALERMO, 1997).

A durabilidade das estruturas pode ser definida em função da segurança, servicibilidade, resistência, solidez e estética obtidas mediante manutenção contínua, (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A manutenção deve ser, sempre que possível, segundo SOUZA e RIPPER (1998) preditiva ao invés de preventiva, pois esta última gera maiores custos. Intervenções e sistemas de reparos oferecem maior durabilidade às estruturas, porém, pode tornar onerosa a manutenção, inviabilizando, dessa forma, a recuperação.

1.4 LIMITAÇÕES

Algumas limitações foram impostas no decorrer deste trabalho, tais quais:

- necessidade de se iniciarem os ensaios com sete dias de cura úmida, devido ao breve cronograma imposto pelo programa P & D da ANEEL;
- ensaios como absorção por imersão e por capilaridade deveriam ter pelo menos três corpos-de-prova (CPs), porém a restrita quantidade de moldes e utilização destes mesmos moldes em outros ensaios, limitaram para 2 a quantidade de CPs para tais ensaios;

- a aplicação de reparo de alta resistência inicial tornou necessária a realização de ensaios de resistência à compressão axial (RC) com 24 horas de cura;
- areia em condições naturais foi utilizada, prevendo-se dosar argamassas com materiais encontrados facilmente no mercado, mesmo apresentado caracterização não conforme as Normas Técnicas Brasileiras. Estas apresentaram detritos como folhas em sua composição;
- as dosagens de argamassas foram realizadas em betoneira, pois era grande a quantidade a ser misturada e a argamassadeira não comportaria tal quantidade.

1.5 CONTEÚDO

Para a melhor explanação e compreensão do tema proposto, a dissertação foi estruturada em sete capítulos.

No Capítulo 1 consta a introdução, na qual se comentam os objetivos, hipóteses e justificativas da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica de manifestações patológicas em estruturas subterrâneas de concreto, bem como características de materiais utilizados em reparos estruturais.

O Capítulo 3 contém o levantamento das manifestações patológicas realizado em visitas técnicas nas câmaras e caixas subterrâneas, compreendendo também a coleta e análise química das amostras de concreto, solo, material de revestimento e água residual das estruturas subterrâneas.

O Capítulo 4 apresenta o programa experimental baseado em sistemas de reparo com argamassas contendo adições e argamassas comerciais, avaliando as características de resistência mecânica e permeabilidade desses materiais.

O Capítulo 5 apresenta os resultados de ensaios feitos em amostras e testemunhos retirados das câmaras e caixas subterrâneas, e provenientes das dosagens de argamassas de reparo.

No Capítulo 6 é realizada a análise dos custos.

No Capítulo 7 encontra-se a explanação das considerações finais do estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

O cimento vem sendo utilizado desde a época do Egito Antigo, sendo que os gregos e romanos já empregavam gesso e calcário calcinados misturados à água, cal, areia, pedra ou telhas fragmentadas. Essas misturas formaram os primeiros concretos que foram utilizados em construções de aquedutos, muros, fundações, cúpulas, entre outras estruturas (NEVILLE, 1997).

Conforme HELENE (1992), ANDRADE e DAL MOLIN (1997) e MEHTA e MONTEIRO (1994) o material mais utilizado para construção civil é o concreto, em função principalmente da sua resistência à água, disponibilidade, custo e facilidade de execução em diversas formas e tamanhos. CÁNOVAS (1988) comenta que as principais propriedades do concreto são a resistência mecânica, estabilidade e a durabilidade.

O concreto atualmente é definido como um material compreende basicamente de um meio aglomerante de cimento e água, no qual se encontram submersas partículas e fragmentos de material granular, como areia, pedregulho, pedra britada ou escória de alto forno. Em algumas ocasiões são usados aditivos e adições para obter concretos mais resistentes ou com maior trabalhabilidade e durabilidade.

A estrutura do concreto é considerada heterogênea e complexa, dificultando o controle sobre as características do material. As proporções e propriedades dos materiais que compõem o traço do concreto são os fatores que mais afetam sua resistência.

A existência do concreto armado se deve à necessidade de serem utilizadas barras ou cabos de aço com a finalidade de incrementar a resistência a

esforços de tração. No concreto armado, o aço e o concreto trabalham em conjunto, mantendo uma perfeita boa entre os materiais.

A classificação do concreto é baseada na sua resistência à compressão, axial podendo ser alta, moderada ou baixa. De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994) a resistência do concreto é inversamente proporcional à sua porosidade, sendo este fator principal e limitante para a durabilidade do material. Outras propriedades influenciam na durabilidade do concreto, como o módulo de elasticidade, a estanqueidade e impermeabilidade.

Algumas vantagens do concreto armado podem ser apresentadas em relação ao uso de estruturas metálicas, como maior resistência ao fogo e a carregamentos cíclicos, manutenção e deformações em menor escala, além de baixo custo.

As deformações do concreto decorrentes de carregamentos, retração, secagem ou resfriamento são responsáveis pelo aparecimento de fissuras que afetam a durabilidade das estruturas.

A durabilidade está relacionada à vida útil do concreto sujeito às condições do meio ambiente no qual esse material está inserido. SOUZA e RIPPER (1998) definem vida útil como período em que o material mantém suas propriedades acima dos limites mínimos especificados.

HELENE (1992) considera o concreto um material de vida útil elevada, sempre que receber manutenção programada e sistemática, mesmo assim, manifestações patológicas podem aparecer com intensidade e incidência que possam comprometer o desempenho das estruturas, às vezes tornando impossível a correção.

2.2 ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS DE CONCRETO ARMADO

Devido às excelentes características do concreto armado, este material foi utilizado em diversos tipos de ambientes agressivos como áreas marinhas, industriais e também nas estruturas enterradas em solos (CASCUDO, 1997).

Estruturas como fundações, canalizações de efluentes, tanques de combustíveis, garagens, caixas de passagem de telefonia e energia elétrica estão sujeitas à ação do meio ambiente.

Em obras subterrâneas, a água do solo, lençol freático e/ou rios podem-se infiltrar no concreto devido à sua alta porosidade, acarretando problemas de degradação por ataque de sulfatos, corrosão de armaduras e ataques por microorganismos.

Devido à localização das estruturas subterrâneas, dificilmente as manifestações patológicas são detectadas no início de sua ação, podendo ser encontradas em avançado estado de degradação quando não inspecionadas por um longo período de tempo.

No caso de câmaras e caixas de passagem existe a preocupação do acesso a estas estruturas de concreto, que localizadas em avenidas e calçadas, prejudicam o trânsito de pessoas. Outra dificuldade é a vistoria da estrutura que, muitas vezes, é realizada anualmente apenas para inspeção da parte elétrica.

As câmaras contêm em seu interior um transformador, que além de aumentar a temperatura ambiente devido à transformação da energia distribuída para consumo, apresenta risco ao profissional que executa a vistoria e à própria estrutura, no caso de explosões causadas pelo transformador ou gases encontrados nas paredes da câmara.

Devido aos fatos supracitados, a recuperação destas estruturas deve ser realizada de forma rápida e eficiente, minimizando impactos para a população.

CARVALHO et al. (2000) e AGUIAR (2000) relatam degradações em reservatórios enterrados e em galerias pluviais onde ocorreram manifestações como corrosão de armadura, aparecimento de fissuras, presença de infiltrações, desagregações do concreto e da argamassa. No caso de galerias com infiltração de esgoto, há a formação de ácido sulfúrico devido à presença de bactérias anaeróbias produtoras de ácido sulfídrico, deteriorando o concreto por perda de massa.

2.3 AMBIENTE AGRESSIVO

Poluentes atmosféricos, substâncias gasosas, sólidas ou líquidas presentes na atmosfera de centros urbanos podem causar alterações na forma de poluição, como o monóxido de carbono (CO), monóxido de nitrogênio (NO) ou dióxido de enxofre (SO₂). Estas substâncias podem ser encontradas em locais de alto tráfego de automóveis e áreas industriais (SILVA, 1995).

A origem dos poluentes encontrados na atmosfera pode ser natural, como maresia, decomposição de matéria orgânica, arraste de poeira, incêndio e evaporação proveniente da vegetação; ou causada pela expansão das atividades humanas, como as originadas pelas indústrias, tráfego motorizado e queimadas.

ODIGURE (2002) cita como exemplo a poluição na Nigéria, proveniente de veículos e máquinas industriais que liberam na atmosfera produtos como Cl⁻, SO₂, CO₂ e CO. Estes produtos, além de afetar os seres humanos, acabam deteriorando as estruturas de concreto.

SHAHIN et al. (2002) alertam sobre a emissão de contaminantes tóxicos na atmosfera como resultado da atividade humana. Além disso, reações químicas podem ocorrer quando alguns elementos existentes no meio são misturados, transportados ou retirados do ambiente.

O acréscimo da população, a frota motorizada e o surgimento de novas indústrias acabam prejudicando a atmosfera e gerando poluentes como mostra a Tabela 1, referente à cidade de Curitiba.

TABELA 1 - POLUENTES ATMOSFÉRICOS DE CURITIBA (PARANÁ, 2001)

POLUENTE	TEMPO DE AMOSTRAGEM (h)	PADRÃO
		($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Dióxido de enxofre (SO_2)	24	365
Monóxido de carbono (CO)	1	40000
Dióxido de nitrogênio (NO_2)	1	320

Fonte: Resolução CONAMA 03/90, SEMA n° 06/92

Segundo ZIVICA e BAJZA (2001), a atmosfera terrestre pode apresentar valores máximos de 2000 mg de CO_2/m^3 ; para SO_2 valores entre 0,2 mg/ m^3 e 5 mg/ m^3 ; e para óxidos de nitrogênio o equivalente a 100 mg/l.

O alto teor de poluentes, em conjunto com fatores climáticos, acaba gerando um ambiente agressivo ao concreto. A água, o solo e o ar são os principais agentes de transporte de substâncias deletérias, que na forma de águas ácidas de chuva e solos sulfatados reagem com os componentes do concreto e gás carbônico.

Segundo SILVA (1995), a análise do solo deve conter quantitativos químicos de teores de carbonatos, bicarbonatos, cloretos e sulfatos, bem como a umidade, resistividade e pH. Para a análise da água é necessário obter os teores químicos de substâncias agressivas ao concreto.

O CO_2 ataca o concreto através dos poros formando o carbonato de cálcio (CaCO_3) e diminuindo o pH para valores próximos de 9, atingindo a armadura por despassivação.

O CO_2 também reage com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dissolvido, bem como os outros produtos carbonatáveis da pasta do cimento, formando os carbonatos.

Conforme o Relatório Qualidade do Ar da Região Metropolitana de Curitiba, realizado em 2001, a região tem clima subtropical e úmido durante o inverno, com a possibilidade de geadas ocasionais e temperaturas mínimas em torno de -3°C . Durante o verão são registradas temperaturas máximas de 35°C . A média mensal

da umidade relativa varia entre 75% e 85%, ocorrendo precipitações durante o ano inteiro registrando valores de 150 mm/mês no verão e 80 mm/mês no inverno.

Como pode ser observado, o microclima da região pode influenciar na degradação de estruturas de concreto, como a corrosão de armaduras e a lixiviação do material. Estes ataques químicos ocorrem em presença de água, umidade e temperaturas variáveis, que alteram os compostos vulneráveis do cimento.

Com o aumento de poluentes na atmosfera, para prolongar a vida útil das estruturas frente aos meios agressivos, há a necessidade de diminuir a permeabilidade do concreto, com o objetivo de aumentar sua durabilidade.

2.4 PERMEABILIDADE DO CONCRETO

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), a hidratação do cimento e a plasticidade do concreto são regidas pela presença da água na mistura. Durante esse processo, parte da água absorvida, proveniente de capilares, acaba evaporando deixando poros no concreto. Tais poros permitem movimentos internos no interior do concreto mediante a condutividade hidráulica, definindo o coeficiente de permeabilidade.

A retração por secagem do concreto induz o aparecimento de microfissuras na pasta e zona de transição com agregados, influenciando no aumento da permeabilidade.

Os fatores que diminuem a porosidade do concreto correspondem à baixa relação água/cimento (a/c), menor granulometria dos agregados, diminuição do consumo de cimento, condições adequadas de adensamento, cura e carregamento.

Segundo SHAHIN et al. (2002), em ambientes agressivos, a deterioração acaba prejudicando o desempenho do concreto, principalmente onde estão presentes ácidos, álcalis e alguns tipos de sais.

A presença de microfissuras na pasta endurecida, absorção e difusão do concreto, permitem a entrada de contaminantes que geram reações com o solúvel Ca(OH)_2 , que na presença de água e SO_3 , CO_2 ou Cl^- produzem gesso, CaCO_3 e CaCl_2 , respectivamente. Na presença do ativo SiO_2 , o Ca(OH)_2 reagirá se combinando para produzir várias soluções sólidas de silicatos de cálcio hidratados (CSH).

A natureza porosa do concreto permite que a variação do volume ocorra devido ao aumento da tensão durante a formação de etringita, envolvendo em suas reações sulfatos, como o $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ por exemplo. Ao contrário, o contaminante SO_2 e, muitas vezes o CO_2 e íons Cl^- conduzem ao aumento da porosidade da estrutura como resultante solúvel CaCl_2 ou monocloroaluminatos instáveis removidos facilmente por lixiviação. Na pesquisa realizada por ODIGURE (2002), verificou-se e confirmou-se por modelo matemático a difusão de contaminantes numa camada de 0mm a 10 mm, baseado no tipo de contaminante e suas reações.

A importância da permeabilidade do concreto deve-se, principalmente, à entrada de poluentes pelos poros ocasionando diversos tipos de degradação. A aceleração do processo de erosão está relacionada à abrasão por atrito de líquidos contendo partículas sólidas, como acontece em canais, vertedores e tubulações de concreto. MARTYS e FERRARIS (1997) apontam os sulfatos e cloretos como os principais íons que ingressam por mecanismos de transporte primário através da difusão e ação capilar.

2.5 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

As manifestações patológicas encontradas no concreto podem ser definidas como sintomas originados por diversas causas das degradações. Conforme SOUZA e RIPPER (1998), as causas dos problemas patológicos podem

ser geradas na etapa de concepção estrutural, execução das estruturas e na fase de utilização.

Ao longo do tempo as propriedades físicas e químicas do concreto se alteram em função das características dos seus componentes e das respostas às agressões do meio ambiente. Estas alterações acabam danificando o concreto sob o ponto de vista da resistência, impermeabilidade, solidez, segurança, utilização e estética.

A quantidade de água misturada ao cimento rege características referentes à capilaridade e à fissuração, devido principalmente, à sua distribuição no concreto e evaporação. A água transportada pelos poros do concreto pode levar para o interior, líquidos e gases contidos no meio ambiente.

MEHTA e MONTEIRO (1994) afirmam que um meio qualquer com pH inferior a 12,5 torna-se agressivo à pasta do cimento. E em concretos de baixa permeabilidade, águas com pH acima de 6 podem não ser prejudiciais. NEVILLE (1997) classifica a agressividade da água em função do pH conforme a Tabela 2.

TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DA AGRESSIVIDADE DA ÁGUA (NEVILLE, 1997)

pH	GRAU DE AGRESSIVIDADE
6,5 a 5,5	Baixo
5,4 a 4,5	Elevado
< 4,5	Severo

OBS.: Valores de pH e agressividade ao concreto.

O poder de dissolução da água na presença de íons e gases decompõe quimicamente materiais sólidos por movimentação, modificando a microestrutura.

SOUZA e RIPPER (1998) definem as causas de deterioração como decorrentes de falhas humanas durante as construções, ausência de manutenção no período de utilização e causas naturais. As causas naturais intrínsecas aos processos de deterioração estão divididas conforme o Quadro 1.

QUADRO 1 - CAUSAS NATURAIS DE DETERIORAÇÕES (SOUZA E RIPPER, 1998)

CAUSAS NATURAIS	Causas próprias	Devido à porosidade do concreto
	Causas químicas	Reações internas do concreto
		Expansão de constituintes do cimento
		Ação de cloretos
		Ataque de ácidos e sais
		Presença de anidrido carbônico
		Presença de água
		Elevação da temperatura interna do concreto
	Causas físicas	Variação de temperatura
		Insolação
		Vento
		Água
	Causas biológicas	Ataque de bactérias

Os principais efeitos de deterioração, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), são os efeitos físicos que influenciam a durabilidade, como a fissuração, o desgaste de superfície, a exposição a temperaturas extremas e alguns efeitos químicos que incluem lixiviação por soluções ácidas, reações expansivas envolvendo ataque por sulfatos, reação álcali-agregado (RAA) e corrosão de armaduras. Estes efeitos podem ser diagnosticados por meio de trincas, fissuras, microfissuras, exsudação de água e desagregação da massa de concreto.

Causas como as exemplificadas no Quadro 1 são de difícil controle. ANDRADE e DAL MOLIN (1997) citam altas temperaturas como um dos principais fatores que aumentam a velocidade das reações químicas, especialmente no caso de corrosão da armadura. Outro fator preponderante é a presença de líquido intersticial nos poros do concreto, sendo um agente altamente degradante de estruturas devido aos ataques químicos. Segundo ASHTON (1982), a deterioração é devida a um sinergismo entre as causas químicas, físicas e biológicas.

2.6 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO ARMADO

Conforme MEHTA e MONTEIRO (1994) os mecanismos de deterioração do concreto armado se dividem basicamente em mecanismos físicos e químicos.

Os mecanismos físicos ocorrem de três formas diferentes:

- abrasão;
- erosão;
- cavitação.

A abrasão pode ser definida como o desgaste por atrito entre um sólido e o concreto. Isto ocorre, por exemplo, em pavimentos de concreto onde o tráfego provoca o desgaste da superfície por atrito seco, ou seja, sem presença de líquidos.

A erosão é similar à abrasão, mas diferenciada pela presença de líquidos contendo partículas sólidas. Este mecanismo ocorre geralmente em vertedores de barragens ou canalizações. KORMANN (2002) comenta o aumento do efeito erosivo em concretos quando a água contém ácidos e sais reagentes com elementos do cimento dissolvido.

A cavitação é caracterizada pela ruptura de bolhas de vapor formadas em fluxos de água.

A deterioração por ataque químico do concreto ocorre devido à interação dos constituintes da pasta do cimento com o meio ambiente externo.

A pasta hidratada de cimento Portland apresenta pH variando entre 12,5 e 13,5. Quando um meio com pH menor entra em contato com a pasta de cimento, este acaba desestabilizando os produtos finais de hidratação mediante a redução da alcalinidade dos poros. Isto acarreta o aumento da porosidade, diminuindo a resistência, provocando fissuras e consequentemente, lascamentos no concreto.

Outra forma de deterioração química é relacionada à presença de sais como o cloreto, sais de alumínio, magnésio e sulfatos, que em contato com a pasta de cimento ou na armadura, reagem com o hidróxido de cálcio.

O ataque por microorganismos ocorre geralmente em ambientes contendo fungos e bactérias que fixados à superfície do concreto utilizam o nitrogênio do ar para proliferar (NEVILLE, 1997). O ácido sulfúrico é formado por bactérias que a partir de sulfatos reagem com o hidróxido de cálcio e formam gesso. Este,

combinado com o C_3A , forma a etringita que, além de tornar mais frágil a pasta do cimento, provoca expansões e fissuração no concreto.

2.6.1 Fissuras

Durante a execução do concreto pode-se iniciar o processo de fissuração desse material. Segundo DAL MOLIN (1988), logo após o lançamento do concreto ocorre a sedimentação de partículas sólidas que movimentam bolhas de ar e água aprisionadas na pasta, causando fissuras decorrentes do encontro com obstáculos como agregados, armaduras ou moldes.

A absorção da água pelos agregados ou pelas fôrmas e a evaporação rápida da água de amassamento impedem a adequada percolação na superfície do concreto, fenômeno influenciado principalmente pela cura, temperatura e umidade relativa do ar.

A movimentação de fôrmas durante o lançamento até o início de pega do concreto provoca fissuração devido a sobrecargas, escoramento, amarração e adensamento.

A retração por secagem é influenciada diretamente pela temperatura do ambiente e pode ocorrer também quando existe uma variação térmica pela ação do fogo, insolação ou pela liberação de calor de hidratação, como em barragens de gravidade.

THOMAZ (2000) aborda as fissuras provocadas por recalques de fundações, esforços à flexão e torção e deformações de elementos estruturais, flechas e deslocamentos.

A cristalização de sais nos poros do concreto leva ao aumento de tensões por pressão produzindo fissuras na pasta. Um exemplo de sal encontrado comumente na orla marítima é o $NaCl$ (cloreto de sódio).

A ação do gelo-degelo é considerada outra forma de ataque por meio de fissuras e posterior destacamento do concreto, causado pela expansão da pasta.

Outras formas de fissuração são ocasionadas pela corrosão de armaduras, reações expansivas com sulfatos e reações expansivas como a reação álcali-agregado (RAA).

ANDRADE (1992) sugere uma abertura máxima admissível para fissuras de 0,4 mm para ambientes não agressivos e 0,1 mm para ambientes agressivos. A NBR 6118/03 prescreve um limite mínimo de 0,2 mm para verificação de estruturas sob o estado limite de utilização. A relação recobrimento/diâmetro de estruturas é um fator decisivo para inibir a fissuração.

2.6.2 Eflorescências

O contato da água corrente de baixa dureza com a pasta de cimento tende a hidrolisar ou dissolver os produtos contendo cálcio, como o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , atingindo o equilíbrio químico e lixiviando tais compostos presentes no concreto. Este tipo de água provém de chuvas, infiltrações e umidade (GENTIL, 1996).

Esta forma de decomposição química diminui a resistência do concreto deixando os constituintes cimentícios como géis de sílica e alumina. Além do CO_2 , que interage com o material lixiviado formando o carbonato de cálcio (CaCO_3), conforme a equação (1).



Esta equação é conhecida como eflorescência, onde a lixiviação do Ca(OH)_2 , retira o carbonato de cálcio solúvel, processo que é caracterizado por depósitos de crostas brancas na superfície do concreto. Eflorescência encontrada em câmara subterrânea pode ser vista na Figura 1.



FIGURA 1 - EFLORESCÊNCIA ENCONTRADA NA TAMPA DE CÂMARA SUBTERRÂNEA

Tais manchas, comuns em estruturas de túneis de concreto, caixas de água e valas, onde ocorre a livre percolação de água, diminuem a proteção química e o pH do concreto, e em alguns casos, formam estalactites decorrentes de lixiviação acentuada.

2.6.3 Ataque por Sulfatos

O concreto, quando inserido em locais com elevada concentração de sulfatos, está sujeito a alterações químicas na matriz da pasta. Reações envolvendo a formação de produtos expansivos são provenientes de contato de SO_4 em soluções aquosas. Estas reações acarretam perda de massa, coesão e resistência dos concretos utilizados em estruturas subterrâneas e em regiões industriais (AL-AMOUNDI, 2002).

A porosidade do concreto e a elevada quantidade de sulfatos encontrados em solos são responsáveis pelo ataque dos sulfatos. Tais ataques ocorrem, em sua maioria, quando o concreto está em contato com a água do mar e lençóis freáticos contaminados.

GENTIL (1996) cita as reações do sulfato com componentes do concreto, como o aluminato tricálcico hidratado (C_3A) que forma sulfo-aluminato de cálcio hidratado ou etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) e o hidróxido de cálcio livre $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ que forma sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

As presenças de sulfato de sódio, cálcio e magnésio ocasionam a redução da resistência do concreto devido ao aumento do volume da água, que ao se expandir, provoca fissuração do concreto, desestabilizando os cristais de CSH.

A maior ou menor facilidade da ocorrência de reações com sulfatos é influenciada pela água e, principalmente, pela qualidade do concreto. A qualidade está relacionada com a relação a/c, tipo de cimento e, conseqüentemente, com o transporte de água pelos poros do concreto (GENTIL, 1996).

2.6.4 Reação Álcali-Agregado

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) além das reações expansivas de sulfatos, existem diversas outras reações envolvendo íons alcalinos, hidroxilas e constituintes silicosos.

A variação da temperatura, a ação da água, do grau de hidratação e de alguns constituintes do concreto, podem provocar o surgimento de reações álcali-agregado (RAA), resultando na deterioração de estruturas através da fissuração e expansão do concreto, o que tem sido observado em obras de grande porte. Estas são evidenciadas pela localização das fissuras em forma de mapa, eflorescência, exsudação de gel e descoloração do concreto (SABBAG, 2003).

Existem três tipos de reações álcali-agregado denominadas:

- reação álcali-sílica;
- reação álcali-silicato;
- reação álcali-carbonato.

Conforme a Figura 2a, a reação álcali-sílica ocorre quando a partícula de sílica reativa é circundada por componentes da pasta do cimento como íons Na^+ e Ca^{2+} em solução básica. Na Figura 2b, é mostrada a formação de uma fina camada de gel álcali-sílica. Na Figura 2c, os íons de Na^+ e Ca^{2+} penetram na camada de gel para reagir com a sílica. Quando a concentração de cálcio é insuficiente, os álcalis reagem formando um gel de álcali-sílica que na presença de água se expandirá

provocando fissuras. Este tipo de reação ocorre com maior frequência no Brasil (PAULON, (1981) apud SABBAG, 2003).

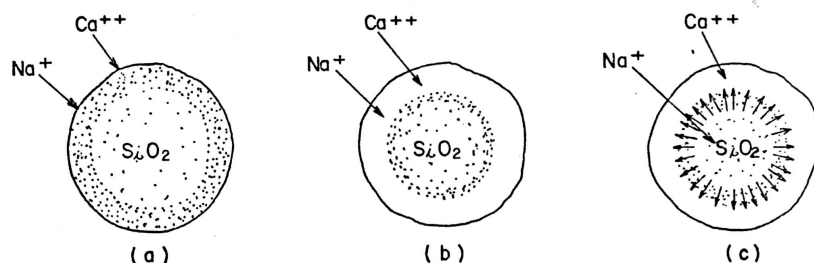


FIGURA 2 - REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA (PAULON (1981) APUD SABBAG, 2003)

A reação álcali-silicato é similar à reação álcali sílica, porém mais lenta. Os álcalis do cimento juntam-se aos silicatos de rochas como o quartzo. Diferente das outras reações, a reação álcali-carbonato ocorre com a presença de calcários dolomíticos.

HASPARYK (1999) cita as propriedades dos materiais, cimento e agregado, e outros fatores como temperatura, umidade, tempo e tensões internas, como principais responsáveis pela reação álcali-agregado. VALDUGA (2002) demonstra que a permeabilidade do concreto, em conjunto com o teor de álcalis e agregados, influencia na degradação acelerada dos concretos.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) comentam que os silicatos e minerais de sílica, bem como a sílica hidratada (opala) ou amorfa (obsidiana, vidro de sílica), podem reagir com soluções alcalinas. Cimentos com teor de óxido de sódio superior a 0,6% são considerados altamente alcalinos e quando utilizados em elevado consumo com agregados reativos contendo teor de álcalis agravam o processo de RAA.

2.6.5 Corrosão de Armaduras

Há mais de três décadas existem informações sobre corrosão das armaduras no concreto armado que podem ocorrer principalmente em estruturas de concreto aparente. AHMAD (2003) comenta que um dos principais problemas de durabilidade de estruturas é a corrosão de armadura devido à exposição de concretos a ataques por cloretos. Outras causas que afetam a durabilidade são os ataques por gases ácidos e carbonatação. Ressalte-se que os íons cloreto podem estar presentes desde o princípio na mistura dos componentes, ou serem introduzidos por agentes agressivos durante a vida útil do material.

Estudos realizados por AL-BAHAR et al. (1998), em estruturas com mais de 25 anos de utilização, serviram para determinar as causas e extensão de danos causados pela ação da corrosão induzida, carbonatação e principalmente ataque por cloretos. Observou-se também a incidência de corrosão em regiões com elevada temperatura, umidade excessiva, solos agressivos com presença de sulfatos e cloretos, e materiais com teor de cloretos utilizados para confecção do concreto.

A qualidade do concreto, a alta relação a/c (aumento da permeabilidade), tipo do cimento, impurezas nos materiais, fissuras em superfícies, densidade e espessura do cobrimento, relacionados ao ambiente externo suscetível à umidade, oxigênio, temperatura, ataque de bactérias e correntes elétricas perdidas, iniciam ou alimentam a corrosão (GENTIL, 1996).

A correta camada de cobrimento proporciona uma maior proteção para o aço. Esta barreira, formada por película de caráter passivo, denominada proteção química, e em virtude do pH do concreto se situar por volta de 13,5 (meio alcalino), faz com que o aço mantenha-se passivo e, portanto, a estrutura apresenta durabilidade e desempenho adequados. Barreiras físicas podem ser formadas em volta da superfície metálica pela precipitação de plaquetas hexagonais de Ca(OH)_2 .

Neste caso, o concreto resulta num sólido poroso, permitindo a permeabilidade tanto por capilares como por poros.

CASCUDO (1997) apresenta a corrosão como a transformação de um metal em íon metálico. Segundo AHMAD (2003), a corrosão do aço inserida dentro do concreto é definida como um processo eletroquímico, onde a superfície do aço corroído funciona como um eletrodo composto por ânodo e cátodo conectados eletricamente pelo corpo do aço gerado pela diferença de potencial entre dois pontos com reações, tais como:



A equação (2) mostra a reação do ânodo como processo de oxidação que resulta em dissolução ou perda de material. A equação (3) mostra a reação catódica como redução de íons do eletrólito resultando em redução de oxigênio dissolvido. A equação (4) mostra a formação de íons hidroxila como um condutor metálico que permite o fluxo eletrônico no sentido ânodo-cátodo e o eletrólito.

Conforme GENTIL (1996) os principais produtos de corrosão são o óxido de ferro, que aparece na natureza na forma de Fe_2O_3 e a ferrugem, que aparece como Fe_2O_3 hidratado. O produto da corrosão se assemelha ao inverso do processo metalúrgico onde, a partir de minérios, obtém-se o metal. Os metais reagem naturalmente com líquidos e gases encontrados no meio ambiente e se propagam pelo concreto.

A água contida nos poros serve como meio aquoso carregado ionicamente como um eletrólito complexo, formando assim uma célula de corrosão como mostrada na Figura 3 (1). Esta fase líquida é essencial para o processo eletroquímico de corrosão, permitindo ocorrer as reações anódicas (2) e catódicas (3) bem como a ocorrência do fluxo iônico.

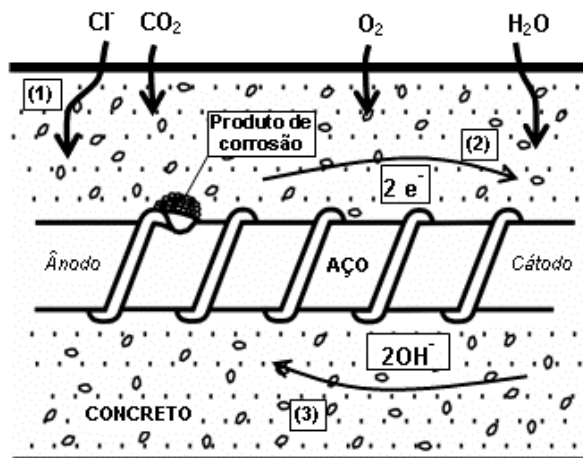


FIGURA 3 - CORROSÃO DE ARMADURA (AHMAD, 2003)

Os fatores internos que afetam a corrosão são:

- presença de umidade e oxigênio;
- umidade relativa e temperatura.

A respeito da presença de umidade e oxigênio, enquanto a umidade cumpre a exigência eletrolítica da célula de corrosão, a umidade e oxigênio juntos ajudam na formação de mais OH^- (3), produzindo o componente mais ferruginoso, $\text{Fe}(\text{OH})_2$. O oxigênio também afeta o progresso de reações catódicas. Na ausência de oxigênio, até mesmo em uma situação de despassivação, a corrosão não progredirá devido à polarização catódica.

A umidade relativa afeta principalmente a carbonatação do concreto. Valores entre 80% e 100% de umidade relativa podem não permitir o processo da carbonatação. Valores entre 50% e 30% de umidade relativa podem não causar carbonatação de concreto, especialmente quando o CO_2 se encontra em concentração normal ou até mesmo depois de um longo período de exposição. O aumento da temperatura geralmente aumenta também as taxas de reação química, influenciando significativamente na profundidade de carbonatação. Ou seja, elevada temperatura e umidade levam à indução da corrosão.

Uma vez iniciado o processo de corrosão, este se propaga a uma taxa fixa devido à expansão do volume do aço corroído, ao destacamento do cobrimento e à

fissuração, diminuindo a vida útil do concreto. Esse processo pode ser visualizado através da perda de seção de armaduras e massa do concreto. A resistividade elétrica do concreto restringe a taxa de corrosão reduzindo o fluxo de corrente elétrica de anódica para catódica.

Conforme ANDRADE (1992), a corrosão pode ser classificada pela extensão e área atacada, sendo apresentada de diversas formas: localizada, generalizada, pite e fissurante. A corrosão generalizada ocorre devido à carbonatação nos locais em que há redução do pH; a localizada é devida a ataques por íons despassivantes como cloretos ou sulfatos e tensões no concreto quando protendido. A Figura 4 mostra a corrosão generalizada, pite e fissurante. A Figura 5 mostra a corrosão por carbonatação do concreto.

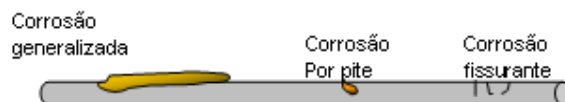


FIGURA 4 - CLASSIFICAÇÃO DE CORROSÃO (CASCUDO, 1997)



FIGURA 5 - CORROSÃO DE ARMADURA DEVIDO À CARBONATAÇÃO

Ambientes agressivos como os de indústrias, onde existem gases, líquidos ou sólidos agressivos, ou mesmo ambientes marinhos, proporcionam condições para a corrosão de armadura no concreto armado.

2.6.5.1 Ataque por Cloretos

CASCUDO (1997) refere-se ao contaminante cloreto como o maior causador de corrosão dos metais no concreto devido à destruição da camada passivadora da armadura em conjunto com a presença de água e oxigênio.

A presença de grandes quantidades de cloretos, introduzidos intencionalmente em água de amassamento como acelerador de pega, presentes nos agregados contaminados, ou posteriormente infiltrados em concreto armados, ocasionam a diminuição da alcalinidade do concreto por reação com substâncias ácidas do meio.

ANDRADE (1992) indica a entrada de cloretos na forma de aditivos, na água, como componentes do cimento e algumas vezes, em agregados. O teor de cloretos máximo de um concreto fresco deve ser em torno de 0,4%, em relação à massa do cimento ou 0,1% em relação à massa do concreto. AHMAD (2003) indica os limites de teores de cloretos em 0,15% para os Estados Unidos e 0,30% para a Índia.

A infiltração de cloretos no concreto pode ocorrer por absorção capilar, permeabilidade sob pressão, migração iônica e o mecanismo de difusão de íons cloretos. Pode ser relativamente lenta quando não transportados por forças capilares, como em ambientes marinhos. Outros fatores responsáveis pela infiltração de cloreto são: fissuras, concentração de cloretos no ambiente externo, temperatura, umidade e qualidade do concreto no que se refere principalmente à distribuição e tamanho dos poros, pasta hidratada e a interconexão entre eles.

CASCUDO (1997) apresenta o cloreto em três tipos de forma no concreto: ligado quimicamente ao C_3A formando $C_3A.CaCl_2.10H_2O$ (cloro-aluminato de cálcio), adsorvido na superfície, ou sob a forma de íons livres, conforme apresentado na Figura 6.

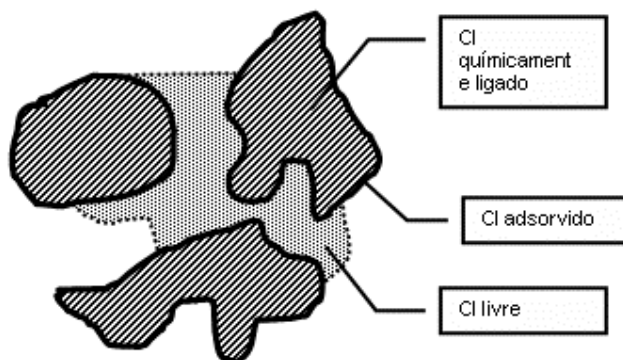


FIGURA 6 - OCORRÊNCIA DE FORMAS DE ÍONS NO CONCRETO (CASCUDO, 1997)

A profundidade da iniciação de ataque por cloretos é obtida pela equação (5), mostrada a seguir.

$$x = k.(t)^{1/2} \quad (5), \text{ onde:}$$

x: profundidade de carbonatação

t: tempo para alcançar a profundidade de carbonatação

k: função dos fatores supracitados

BAI et al. (2002) comentam a importância da relação entre absorvidade e resistência, pois minimizando a absorvidade consegue-se a redução da penetração de sulfatos e cloretos que causam danos a estruturas de concreto.

2.6.5.2 Carbonatação

A deterioração do concreto está diretamente relacionada ao movimento das águas nos poros, podendo ser na forma líquida ou vapor, que em conjunto com a alta permeabilidade, permite o transporte de CO_2 proveniente de veículos ou outros gases, reagindo com os componentes da pasta hidratada (BENAZZOUK, 2004).

KULAKOWSKI (2002) ressalta que fatores como o aumento da porosidade devido ao uso de concretos com elevada relação (a/c), bem como a otimização de peças desrespeitando valores mínimos de cobrimento estipulado em normas e códigos, interferem na vida útil do concreto.

A alta alcalinidade do concreto deve-se à presença de Ca(OH)_2 na pasta de cimento. A redução da alcalinidade pode ocorrer por lixiviação dos compostos básicos como KOH, NaOH e Ca(OH)_2 e pela ação do CO_2 do ar, bem como pela ação de gases ácidos provenientes do SO_2 e H_2S (CASCUDO, 1997).

Segundo ANDRADE (1992), o processo de redução de alcalinidade por efeitos do CO_2 denomina-se carbonatação, onde o pH do concreto diminui para valores inferiores a 8,0 na presença de umidade relativa entre 50 e 80%. Quando a umidade for superior a 80% a água tende a saturar os poros do concreto dificultando a entrada do CO_2 . Quando a umidade relativa for baixa, os poros se encontram secos e acabam não reagindo por falta da água.

No estudo do processo da carbonatação CEUKELAIRE e VAN NIEUWENBURG (1992), verificaram a importância da umidade, onde a maior velocidade de carbonatação se deu com 50% de umidade relativa.

A reação básica da carbonatação é mostrada pela equação (6).



Outra reação pode ser encontrada quando houver CO_2 em excesso, formando o solúvel bicarbonato de cálcio, como mostra a equação (7).



A ação da carbonatação no cobrimento do concreto pode ser visualizada pela equação (8) que ocorre a uma velocidade lenta, atenuando-se com o tempo devido à ação do CaCO_3 (carbonato de cálcio) que satura os poros superficiais dificultando o ingresso de CO_2 no concreto.

$$e = k \cdot (t)^{1/2} \quad (8), \text{ onde:}$$

e: espessura carbonatada

k: constante

t: tempo

A constante k depende do tipo e quantidade de cimento, relação a/c e resistência do concreto. A Figura 7 mostra a espessura de carbonatação em relação ao cobrimento de um elemento de concreto armado.

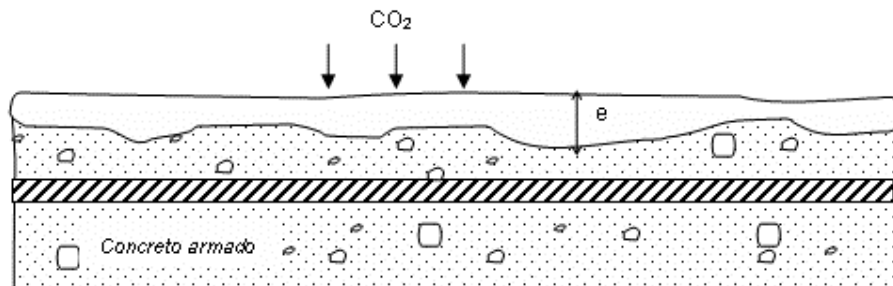


FIGURA 7 - CARBONATAÇÃO DO CONCRETO ARMADO (ANDRADE, 1992)

O avanço da carbonatação, que separa duas zonas, uma com pH menor que 9,0 e outra com pH maior que 12,0, é denominada frente de carbonatação. Quando a frente de carbonatação encontra a armadura acaba provocando a despasseivação da mesma e iniciando o processo de corrosão.

ANDRADE (1992) alerta sobre a carbonatação em concretos com adição de cloretos, pois aumenta o potencial de corrosão e os efeitos do CO_2 em cloroaluminatos do cimento que desagregam, deixando livres os cloretos que se encontravam combinados.

2.7 INSPEÇÕES E CADASTRO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

As estruturas de concreto devem ser inspecionadas, testadas e avaliadas para se chegar a uma conclusão quanto à sua durabilidade. A palavra durável pode ser utilizada quando, em seu ambiente, o concreto apresenta desempenho pré-determinado, sem custo excessivo para manutenção e reparos devido à degradação ou deterioração.

A durabilidade não é somente um atributo ou conjunto de especificações. É uma conclusão sobre um concreto específico com desempenho e utilidade previamente estipulados.

MATHER (2004) aborda o problema do preparo das especificações para concreto quando submetidos a ambientes agressivos. Os principais motivos para a degradação do concreto podem ser resumidos em:

- ação do ciclo gelo e degelo;
- molhagem e secagem;
- variação de temperatura;
- carregamentos;
- cavitação, erosão e abrasão;
- ataque por soluções ácidas;
- ataque por sulfatos;
- corrosão de aço;
- ataques microbiológicos.

Baseados na investigação realizada por ANDRADE (1992) e AL-BAHAR et al. (1998), foram definidos os seguintes procedimentos:

- inspeção visual do local, registrando as manifestações encontradas;
- verificação do histórico das estruturas e dos detalhes construtivos dos projetos, como a espessura de cobrimento, o espaçamento e diâmetro da armadura;
- busca das principais causas das manifestações, como a utilização de indicador químico com 1% de fenolftaleína em álcool etílico, que permite verificar o pH do concreto;
- ensaios com testemunhos obtidos das estruturas danificadas, permitindo avaliar a resistência, porosidade e composição química e física;
- análise e interpretação dos resultados obtidos;
- técnicas de ensaio não destrutivos dos componentes da estrutura;
- teste de cargas dos componentes da estrutura quando houver necessidade ou condição.

Com relação à inspeção visual do local, esta pode ser realizada em duas etapas, uma como vistoria preliminar e outra como vistoria detalhada, quantificando a extensão da deterioração. O exame visual pode ser realizado em conjunto com o levantamento fotográfico permitindo assim comprovar e mapear os sintomas encontrados.

Buscando determinar as principais causas das manifestações, JUNG (2002) retirou o cobrimento de estruturas e utilizou fenolftaleína na determinação das espessuras de carbonatação. Valores entre 3,6 a 8,3 mm indicaram o início de deterioração.

Além disso, em vistorias, as fissuras devem ser mapeadas e anotadas nas fichas de avaliação em função do comprimento e da espessura. Alguns dos itens mencionados encontram-se na Figura 8, onde se prevêem meios auxiliares para acesso a estruturas danificadas, assim como a realização de plano de amostragem para obtenção de resultados representativos. As fichas devem ser preenchidas com auxílio de croquis, onde são descritas todas as observações coletadas durante a vistoria como manchas, infiltrações, armaduras expostas, entre outras causas de deterioração.

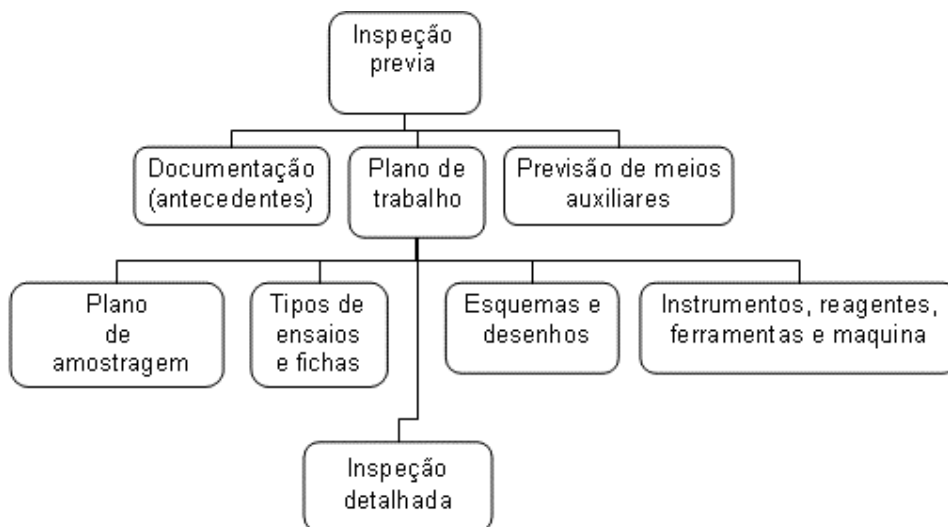


FIGURA 8 - INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS COM CORROSÃO (ANDRADE, 1992)

2.8 ENSAIOS DE TESTEMUNHOS

O plano de amostragem de testemunhos é limitado por ser um processo destrutivo. ANDRADE (1992) define as zonas de extração em função do ambiente externo, como exposição ao sol, e zonas onde ocorre o máximo de trabalho mecânico e degradações devidas à corrosão. O autor ainda indica a necessidade de retirar testemunho de região em condições similares às estabelecidas por projeto, promovendo assim a comparação das mesmas pela variabilidade.

A NBR 7680/83 estabelece a amostragem do concreto em lotes com “n” testemunhos, número que é função da área e volume de concretagem. Segundo esta norma, o diâmetro de testemunhos extraídos deve medir 15 cm e em casos onde não seja possível retirá-los com tal dimensão, seu diâmetro deve ser equivalente ou maior a três vezes a dimensão máxima característica do agregado.

Para iniciar a operação de extração é necessário:

- marcar o local de extração de testemunho verificando a acessibilidade e condições de operação do equipamento de corte com broca, que necessita água durante sua realização;
- fixar a plataforma do equipamento no local escolhido;
- introduzir a broca imprimindo pressão a uma velocidade constante;
- retirar o testemunho que deve ser posteriormente embalado em plásticos e acomodado em caixas contendo serragem para evitar perda de umidade e impactos por transporte.

Para realizar ensaios de compressão axial os CPs devem manter a relação altura/diâmetro (h/d) do testemunho capeado equivalente a dois. No caso deste valor ser superior, o testemunho deve ser aparado com disco de corte. Para dimensões menores que dois, deve-se utilizar o fator de correção para diminuir o valor da resistência obtida na prensa.

Para mais informações sobre o testemunho, este deve ser cuidadosamente observado antes do ensaio e depois da ruptura, conforme mostra a Figura 9.



FIGURA 9 - RUPTURA DE TESTEMUNHO

2.9 MICROSCOPIA

A visão macroscópica da estrutura do concreto pode ser obtida a olho nu, equivalente a 1/5 de milímetro, onde se observam basicamente agregados e pasta. MEHTA e MONTEIRO (1994) definem o termo microestrutura quando se utiliza o microscópio para aumentar a dimensão de uma macroestrutura.

A estrutura do concreto é definida pelo tipo, quantidade, tamanho, morfologia e distribuição das fases presentes no sólido, tornando possível prever as propriedades dos materiais. A microestrutura do concreto é constituída de materiais cristalinos com defeitos como fissuras, vazios e contornos de agregados.

Segundo PADILHA e AMBROZIO (1985), no estudo de materiais de engenharia são utilizados quatro tipos de microscopia: microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia eletrônica de transmissão e, em limitadas ocasiões, a microscopia de campo iônico. Na Tabela 3 está mostrada a resolução média de cada equipamento.

TABELA 3 - RESOLUÇÃO DOS EQUIPAMENTOS (PADILHA E AMBROZIO, 1985)

TÉCNICA	RESOLUÇÃO (Å)
Microscopia ótica	3000
Microscopia eletrônica de transmissão	2000
Microscopia eletrônica de varredura	200
Microscopia de campo iônico	< 1

A MEV apresenta excelente profundidade de foco, permitindo assim a análise de superfícies irregulares com fraturas mediante a incidência de um feixe de elétrons que em conjunto com raios-X identificam os elementos presentes.

Os tipos de sólidos encontrados na pasta do cimento hidratado são: CSH que corresponde a 60% do volume sólido da pasta do cimento hidratado e formado; hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) correspondente entre 20% a 25% do volume sólido do cimento hidratado; etringita; grãos de clínquer e sílica.

Conforme MACIEL (2001), macroscopicamente o concreto mostra-se como uma estrutura heterogênea bifásica, composta de agregados e pasta endurecida. Ao ser utilizado o microscópio, é possível observa-se a ligação existente entre o agregado e a pasta denominada zona de transição, ficando uma estrutura trifásica.

A relevância do estudo da zona de transição resulta no conhecimento das propriedades do concreto. O fato de se poder modificar a estrutura do material para a correta utilização é influenciado pelas propriedades do concreto e meio ambiente.

A fina camada que envolve as partículas de agregados é a terceira fase da estrutura do concreto e como se pode esperar é o elo mais fraco, devido à sua espessura.

Conforme MEHTA e MONTEIRO (1994), os sólidos têm resistência inversamente proporcional à porosidade. Conseqüentemente, a porosidade de cada fase pode limitar a sua resistência. Na Figura 10, observa-se a presença de poro em uma argamassa de reparo.

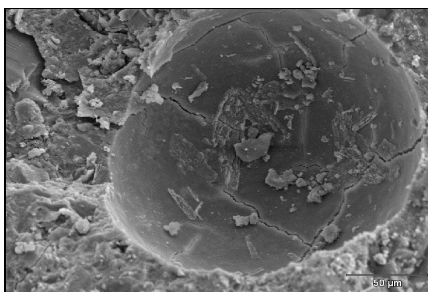


FIGURA 10 - PORO FORMADO EM ARGAMASSA DE REPARO

A porosidade da pasta é facilmente visualizada quando se utilizam diferentes valores de a/c com a mesma quantidade de cimento. Isto se deve ao aumento de quantidade de capilares quando a relação a/c é maior. Quanto maior a relação a/c, menor o grau de hidratação e maior a permeabilidade pelo fato dos poros maiores se conectarem por capilares.

A instabilidade da estrutura do concreto se deve à diversidade de minerais, poros e microfissuras nos componentes, além da modificação dos constituintes devido à umidade, temperatura e ao tempo.

Baixas relações a/c têm capacidade de aumentar a resistência da zona de transição pelo fato dos cristais de NaOH terem seu tamanho diminuído.

O tipo de cimento também influencia a porosidade do concreto, pois o tempo de hidratação é diferenciado. O tempo de cura e o adensamento são relevantes, visto que a falta de controle do tempo, temperatura, umidade e a vibração do concreto, são responsáveis também pela fissuração, hidratação e resistência mecânica do concreto.

2.10 SISTEMAS DE REPAROS

Estruturas de concreto inseridas em ambientes agressivos são suscetíveis à ação de agentes degradantes, como mostrado por BARBOSA et al. (2004). Esse estudo refere-se à manifestações patológicas encontradas em câmaras subterrâneas de passagem de energia elétrica na cidade de São Paulo.

As manifestações de maior incidência foram manchas, fissuras e deslocamento de revestimento, conforme mostra a Figura 11. Como pode ser observado, a realização de reparos para tais estruturas é inevitável.

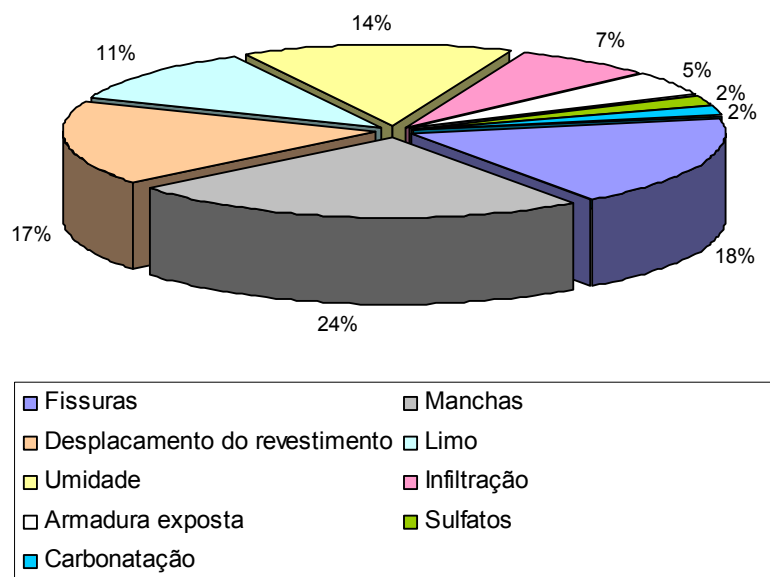


FIGURA 11 - PATOLOGIAS DAS CÂMARAS TRANSFORMADORAS
(BARBOSA, 2004)

Segundo CABRAL (2000), reparos localizados devem ser realizados em função dos danos encontrados nas estruturas, mediante a avaliação da segurança estrutural. Os reparos podem ser insuficientes quando as estruturas estiverem em estado avançado de deterioração química e física. São indispensáveis reconstruções parciais de elementos danificados. ARANHA (1994) classifica a recuperação de estruturas de concreto como:

- sistemas de reparos, onde não há necessidade de incremento de aço ou seção dos elementos estruturais, repondo somente as condições iniciais do concreto;
- reforços estruturais quando há necessidade de aumentar a capacidade resistente mediante reposição de armaduras, seções ou peças estruturais;
- reforços de fundações realizados para a redução da sobrecarga mediante aumento da seção.

As classificações dos diversos sistemas de reparos realizados na Amazônia são apresentadas por ARANHA (1994) e correspondem a:

- sistemas de reparos com argamassas projetadas a ar comprimido;
- grampeamento com aço e resina epóxi;
- injeções de resinas a base de epóxi;
- grauteamento;
- impermeabilizações.

Segundo KULAKOWSKI (1994), os sistemas de reparo seguem a classificação dos materiais conforme a utilização:

- reconstituição da seção;
- revestimento do concreto;
- cobrimento da armadura;
- sistemas especiais de reparo de corrosão de armaduras.

Uma vez escolhido o sistema de reparo ideal, MAILVAGANAM (1992) aponta algumas propriedades de argamassas que podem ser necessárias para o adequado desempenho, tais quais:

- alta resistência inicial;
- baixa permeabilidade;
- aderência e compatibilidade ao substrato;
- coeficiente de dilatação similar;
- expansões leves ou mínimas;
- retração por secagem controlada.

HELENE (1992) cita o concreto como principal material para reparos, pois pode ser dosado com baixa relação a/c, conter adições como sílica ativa, cinza volante, escórias e aditivos como aceleradores de pega, plastificantes e redutores de água. Estes fatores permitem obter as propriedades necessárias aos reparos.

Grautes e argamassas podem ser utilizados quando necessários para proteção, reparos e reforços de problemas em estruturas. Estes materiais são comercializados como misturas prontas, sendo mono ou bi-componentes.

A escolha adequada do reparo com argamassa depende principalmente das características técnicas, e das condições de utilização das estruturas. ARANHA (1994) indica o grauteamento em cisternas, piscinas e reservatórios, justificando a ação do lençol freático na aplicação de reparos com elevada resistência inicial. SOUZA e RIPPER (1998) indicam a argamassa e o concreto como materiais ideais para reparos.

2.11 ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES

No Brasil, o cimento é fabricado em diversos tipos, diferenciados pela variação das características físicas, químicas e mecânicas. Além do cimento, as argamassas de reparo contêm agregado miúdo, oriundo de jazidas naturais ou proveniente de escórias siderúrgicas; são utilizados também diversos tipos de aditivos, como incorporadores de ar, redutores de água, controladores de pega, além da água (ANDRIOLO e SGARBOZA, 1993).

A água da mistura deve conter valores máximos de componentes químicos, adotados pela NBR 6118/03, conforme Tabela 4.

TABELA 4 - REQUISITOS PARA A ÁGUA DE AMASSAMENTO (NBR 6118/03)

COMPONENTES QUÍMICOS	VALOR MÁXIMO
	(mg/l)
Cloretos	500
Sulfatos	300
Sólidos totais em suspensão	5000
Matéria orgânica	3

Aditivos podem ser definidos como produtos formulados para o aumento da trabalhabilidade do concreto fresco, que adicionados em doses precisas, aumentam a capacidade e desempenho do concreto ou argamassa.

AÏTCIN (2000) comenta sobre as propriedades dispersivas de moléculas orgânicas utilizadas para reduzir a tendência flocular de cimentos, denominadas comercialmente como superplastificantes, redutores de água ou agentes dispersivos.

O emprego de aditivos superplastificantes deve-se à necessidade de diminuir a retração em função da redução da relação a/c evitando assim problemas de aderência com o substrato. A redução da água pode variar, sem dificuldades, em torno de 5% a 10% (KULAKOWSKI, 1994).

Segundo a referida autora, deverão ser tomadas precauções no uso de aditivos, como o controle da dosagem e a realização prévia de ensaios de compatibilidade com o cimento. Ao serem utilizados com cimento, interagem com a área específica, aumentando a fluidez e interferindo na hidratação.

2.12 SÍLICA ATIVA

Considerado por AİTCIN (2000) como material cimentício complementar a resistência de concretos, a sílica ativa quando misturada à água pode combinar com a cal formando CSH. O processo é semelhante ao que ocorre no concreto na fase de hidratação, com a elevação do pH.

Do ponto de vista químico, a sílica ativa é composta basicamente do reativo SiO_2 , apresentando baixos teores de impurezas em sua composição.

As partículas esféricas têm diâmetro de 0,1 μm a 2 μm e massa específica de 2,2 g/cm^3 . Beneficiam as propriedades físicas e mecânicas do concreto, por meio de reações pozolânicas e efeito *filler*. A finura da sílica ativa preenche os espaços vazios do cimento, colaborando com a fluidez do concreto de baixa relação a/c, como está mostrada na Figura 12

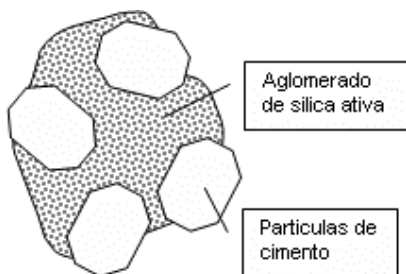


FIGURA 12 - EFEITO *FILLER* QUE OCORRE NA SÍLICA ATIVA (AİTCIN, 2000)

Outra vantagem da utilização da sílica ativa é a redução drástica da exsudação interna, diminuindo a porosidade da pasta. A sílica ativa é a adição mineral mais utilizada (AİTCIN, 2000).

2.13 INIBIDORES DE CORROSÃO

Segundo CASCUDO (1997), os inibidores de corrosão são amplamente utilizados em concreto armado, onde as reações nos ânodos e cátodos são bloqueadas, eliminando a ação eletroquímica das pilhas. A utilização de inibidores de corrosão implica no aumento da vida útil de estruturas, que sofrem corrosão por ataques de cloretos e carbonatação.

CABRAL (2000) classifica os inibidores de corrosão da seguinte forma:

- inibidores seguros e perigosos, função das conseqüências da utilização em diferentes concentrações;
- inibidores oxidantes e não-oxidantes, função da necessidade de oxigênio dissolvido para a existência de reações de proteção;
- inibidores orgânicos e inorgânicos, função da natureza do agente inibidor;
- inibidores anódicos, catódicos e mistos, classificados de acordo com a direção de deslocamento do potencial de corrosão.

Teores ótimos de inibidor de corrosão a base de nitrito de sódio (NS) adicionados em água de amassamento devem ser considerados, pois em concentrações elevadas podem estimular e acelerar o processo de degradação do concreto. Teores entre 1% e 2% indicaram eficiência em diversos estudos citados por CABRAL (2000).

2.14 POLÍMEROS

A utilização de adições de polímeros orgânicos, ou látex, quando disperso em água, diminui substancialmente a permeabilidade do concreto, reduzindo o fácil acesso de contaminantes, umidade e oxigênio que ocasionam a corrosão de armaduras. Como resultado, obtém-se o tamponamento de estruturas perante as reações corrosivas (CASCUDO, 1997).

Segundo KORMANN (2002), a principal vantagem da utilização de polímeros é sua compatibilização com os demais componentes do concreto, aderência ao substrato, bem como resistência à abrasão e aos efeitos de percolação de águas contendo ácidos e sais. Ainda segundo a autora, os melhores desempenhos de polímeros em reparos de concreto são os compostos por estireno-butadieno (EB) e látex acrílico, em proporções de 10 a 20% em massa do cimento.

CABRAL (2000) apresenta três maneiras de uso de polímeros em concreto:

- argamassa de polímero, sendo obtida polimerizando um monômero e agregados com ajuda de agentes de cura em temperatura ambiente;
- argamassa impregnada de polímero, considerada quando o polímero é inserido à argamassa endurecida sob pressão ou por saturação em solução polimérica;
- argamassa modificada com polímero, obtida pela modificação da argamassa durante a mistura pela adição de polímeros.

Segundo o autor, todos os materiais apresentam bons resultados, porém a argamassa modificada tem o menor custo, e sendo assim, é a mais utilizada.

Outro polímero utilizado é o epóxi, no entanto o elevado custo desse material, além do coeficiente de dilatação diferenciado do concreto faz com que seu uso restrinja-se a aplicações superficiais em finas camadas (MAILVAGANAM, 1992).

2.15 ARGAMASSAS E GRAUTES COMERCIAIS

Existe uma grande quantidade de materiais comercializados que podem ser empregados para o reparo de estruturas de concretos. No entanto, estes materiais são indicados para determinadas condições de utilização e agressividade ambiental, sendo necessário o conhecimento das características dos materiais e dos agentes agressivos presentes na região, para que se tenha um desempenho satisfatório dos mesmos nas condições previstas de utilização (CABRAL, 2000).

2.15.1 Argamassas Poliméricas

Segundo SUJJAVANICH et al. (1998), os polímeros foram incorporados às argamassas de cimento em função da necessidade de obras com maior durabilidade. As argamassas poliméricas são também denominadas como argamassas de base mineral, cujo processo de endurecimento está baseado na reação do cimento com a água de amassamento e brita com granulometria contínua. Assim sendo, apresentam retração compensada e propriedades tixotrópicas, ou seja, permitem sua aplicação com colher de pedreiro e utilização em superfícies inclinadas ou verticais.

Segundo HELENE (1992) as resinas acrílicas utilizadas em argamassas poliméricas são:

- resinas do tipo metil-metacrilato ou estireno-butadieno;
- resinas à base de PVA, denominadas como argamassas com adição de látex, sendo que esta denominação é devida ao comportamento do látex utilizado na fabricação de borrachas.

Dentre as resinas poliméricas, a resina tipo estireno-butadieno tem maior campo de aplicação quando em ambientes úmidos e sob ação de meio ambientes agressivos, devido a menor permeabilidade em argamassas.

2.15.2 Argamassas Orgânicas

São materiais preparados com resinas orgânicas puras, por meio de reações de polimerização e endurecimento em ausência de água, obtendo-se aglomeração e resistências mecânica e química, quando expostas a ambientes agressivos. Também mantêm alto desempenho dos reparos e reforços com adequada aderência ao substrato (HELENE, 1992).

2.15.3 Argamassas à Base Epóxi

CÁNOVAS (1988) cita as resinas de base epóxi como o material mais empregado em reparos e reforços de estruturas de concreto, que podem ser fornecidas em dois ou três componentes:

- resina epóxi;
- endurecedor a base de amina ou poliamidas;
- agregados selecionados.

Como principal característica, as argamassas de base epóxi têm elevada resistência a ácidos não oxidantes, álcalis e solventes orgânicos. Apresentam boa aderência e resistência a mecanismos físicos e mecânicos. Porém, expostas a temperaturas maiores do que 70 °C, sua resistência é diminuída, sendo esta sua principal desvantagem (CÁNOVAS, 1988).

2.15.4 Argamassas à Base Fenólica

Segundo CÁNOVAS (1988), estas argamassas são constituídas de resina fenolformaldeído, com adição de *filleres* a base de sílica-carbono, coque pulverizado ou barita e catalisador ácido. Apresentam resistência elevada a ácidos minerais e sais inorgânicos, bem como soluções levemente oxidantes e temperaturas elevadas (em torno de 175 °C).

De acordo com o referido autor, como desvantagem, suas aplicações devem ser realizadas rapidamente e com resfriamento prévio. Assim, apresentam menor resistência a ataques de álcalis e oxidantes fortes.

2.15.5 Argamassas à Base de Poliéster

Estas argamassas podem ser definidas como argamassas de base éster-vinílica, sendo consideradas como um produto tri-componente de resina em solução, catalisador e *filleres* inertes com modificadores de solução. Apresentam excelente resistência mecânica e química frente a ácidos, mas não toleram produtos cáusticos e/ou alvejantes e temperatura superior a 115 °C, conforme HELENE (1992).

2.15.6 Argamassas à Base Furânica

Segundo HELENE (1992), as argamassas à base furânica são constituídas por resina líquida, catalisador e *filler* de composição idêntica à argamassa de base fenólica. Apresentam resistência a ácidos não oxidantes, álcalis e solventes como gases, óleos, graxas e detergentes, e toleram temperaturas de até 200 °C.

2.15.7 Grautes à Base de Cimento

De acordo com HELENE (1992) e KULAKOWSKI (1994), o graute é um material fluido, pois quando recém misturado, é auto-adensável. É indicado para aplicação em locais de difícil acesso, mantendo características como boa aderência, baixa retração e permeabilidade moderada em função da composição básica de cimento.

Os constituintes básicos destes grautes são: o cimento com elevada resistência inicial, agregados com granulometria selecionada, aditivo superplastificante e expensor, que compensam a retração natural destes grautes.

3 LEVANTAMENTO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

MEHTA e MONTEIRO (1994) explicam a possibilidade de verificação de deteriorações em estruturas subterrâneas de concreto durante sua utilização, resultantes de vibrações e do ambiente agressivo em que se encontram.

Estas manifestações patológicas são observadas com frequência em peças estruturais que em contato direto com o solo, ar e água aumentam significativamente a intensidade e incidência da degradação do concreto em função de mecanismos de transportes de líquidos e gases agressivos (HELENE, 1992).

As análises de danos nas estruturas das câmaras e caixas de passagem foram feitas por meio de inspeções em todo o local atingido, considerando-se o grau de agressividade, o concreto e a geometria da estrutura. O levantamento de patologias aparentes no concreto pode auxiliar nos estudos de prevenção e reparos da degradação nas estruturas subterrâneas.

Este capítulo trata da utilização de ficha cadastral e registro fotográfico, bem como da coleta de amostras previamente mapeadas.

3.1 CÂMARAS E CAIXAS DE PASSAGEM DE REDE ELÉTRICA

Construções de elementos resistentes de concreto armado permitem a utilização de estruturas subterrâneas com a finalidade de distribuir, por meio de cabos e transformadores, a energia elétrica em regiões metropolitanas. Como mostrado na Figura 13, redes subterrâneas são compostas por estruturas denominadas câmaras e caixas, que se diferenciam pela função a que se destinam.

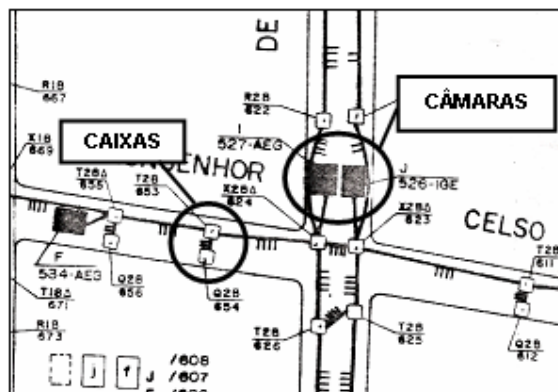


FIGURA 13 - REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - COPEL

A principal função das câmaras é permitir a passagem de cabos de energia elétrica, além de abrigar em seu interior um transformador de alta tensão. As caixas de passagem permitem a entrada e passagem de cabos de alta e baixa tensão em linhas tipo tronco e ramais.

A câmara possui geometria retangular, conforme Figura 14, onde a maioria das peças estruturais são pré-moldadas. Estas são formadas basicamente por quatro paredes, piso, duas tampas de concreto e duas grelhas metálicas para ventilação do transformador. As paredes têm espessura de 15 cm, pé direito de 2,50 m, largura maior de 4,40 m e menor de 2,20 m.

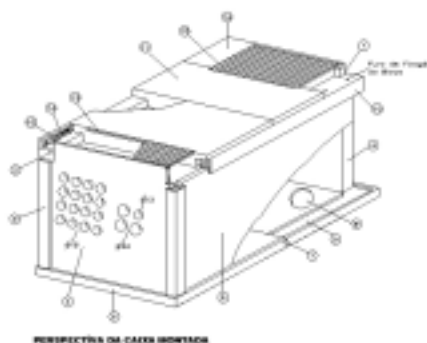


FIGURA 14 - ESTRUTURA DA CÂMARA - COPEL

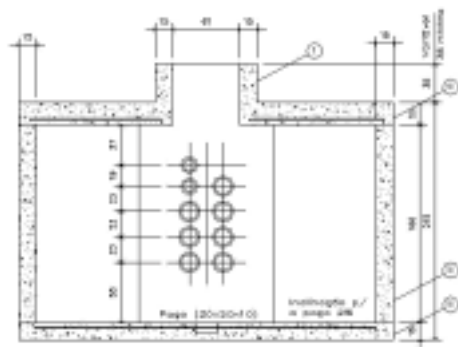
A Figura 15 mostra as grelhas metálicas de ventilação que permitem, além da entrada de ar, a entrada de água e detritos provenientes das ruas. Para o esgotamento da água acumulada dentro das câmaras existe uma bomba submersa

de recalque, protegendo o transformador de possíveis danos. Outro elemento importante a ser considerado é o alojamento para bocais de cabos elétricos, confeccionados com argamassa.



FIGURA 15 - ACESSO À CÂMARA

As caixas de passagem são mais complexas, pois apresentam oito paredes, de dimensões diferentes umas das outras, como pode ser observado na Figura 16 e na Figura 17. O teto é uma laje pré-moldada, sem aberturas, apenas com espaço reservado para a entrada na caixa, como observado na Figura 18. A tampa de ferro fundido não permite a entrada de ar e água de chuva no seu interior. O formato oitavado se deve à facilidade de ligação e distribuição dos cabos de energia elétrica, pois nas caixas não é necessária a utilização de transformadores.



CORTE AA

FIGURA 16 - ESTRUTURA DA CAIXA PERFIL - COPEL

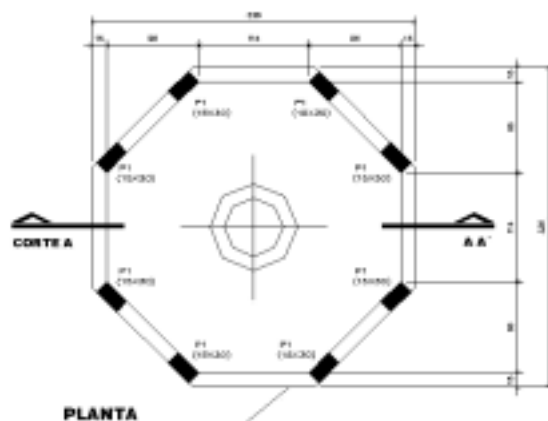


FIGURA 17 - ESTRUTURA DA CAIXA PLANTA - COPEL

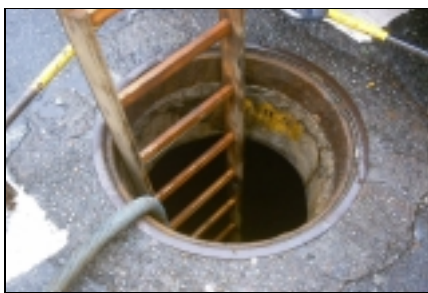


FIGURA 18 - ACESSO À CAIXA

Tanto as câmaras como as caixas têm acesso em locais restritos como ruas, praças e calçadas com alto tráfego de veículos e pedestres. Em especial na cidade de Curitiba, existem rios canalizados, lençóis freáticos e redes de água e possíveis vazamentos que influenciam diretamente nas estruturas enterradas, contribuindo para a degradação do concreto destas construções.

Este tipo de construção subterrânea tem por objetivo proporcionar a segurança dos usuários e terceiros, bem como a prevenção de roubos e vandalismos na rede de cabos de energia elétrica.

De acordo com KLEIN, CAMPAGNOLO e SILVA (1999), as origens de patologias existentes em estruturas subterrâneas são apresentadas como:

- erros de projetos: cálculo equivocado, concepção estrutural inadequada, detalhamento errado ou nulo, cobrimento insuficiente, erros de análise de solicitações;
- problemas de construção: materiais sem qualidade ou especificação, técnicas executivas inadequadas, falta de qualidade e fiscalização;
- falta de manutenção: aceleração da degradação do concreto, reparos ou recuperações com custos exorbitantes;
- solicitações imprevisíveis: excesso de sobrecargas, incêndio, enchentes e explosões;
- ações do meio ambiente: deterioração de materiais componentes da estrutura ou destruição de estruturas perante ações agressivas do meio ambiente.

Considerando os itens supracitados, podem ser observados alguns detalhes, como:

- o valor da resistência característica do concreto (f_{ck}) das estruturas inspecionadas não foi fornecido pelo fato das obras terem sido licitadas e executadas por empresas diferentes, sem a necessidade de garantia da qualidade de construção e dos materiais utilizados;
- as espessuras das paredes que deveriam ser de 15 cm, por vezes, não apresentam esta dimensão;
- verificada a falta de travamento das paredes, afirma-se que não foram previstas solicitações devido a explosões de transformadores ou gases encontrados nas paredes das estruturas;
- nos projetos, não consta a especificação de cobrimento mínimo das armaduras, tendo sido observado que o cobrimento das estruturas não ultrapassava 2 cm;
- verificou-se o emprego de diferentes materiais na composição do concreto de diferentes câmaras e caixas;

- constatou-se a falta de manutenção das estruturas danificadas;
- observou-se calor excessivo devido ao transformador em sobrecarga.

As solicitações de cargas externas atuantes nas estruturas subterrâneas foram atendidas corretamente. Manifestações patológicas foram observadas com frequência nos elementos estruturais devido a agressões do meio ambiente.

3.2 INSPEÇÃO E CADASTRO

Na região metropolitana de Curitiba existem em torno de 200 estruturas subterrâneas, compondo a malha de distribuição de energia elétrica. Destas, foram escolhidas 20 estruturas representativas (10%) para inspeção visual, das quais 10 foram câmaras e as outras 10 foram caixas.

Foi realizada uma visita preliminar a uma câmara para analisar as possíveis manifestações, como fissuras, lascamentos, limo, umidade, corrosão de armaduras, manchas, entre outras.

Determinada a quantidade de vistorias e a localização das estruturas com maior grau de deterioração, conforme indicadas por técnicos de manutenção, foram obtidos os projetos existentes, onde foi possível verificar as características das estruturas a serem inspecionadas.

O projeto estrutural das câmaras foi definido como padrão, porém as caixas de passagem apresentam quatro tipos diferentes, nos quais variam as espessuras de paredes, altura do pé-direito, comprimentos das paredes, forma das tampas de ferro fundido (redonda ou retangular). As diferenças de projetos nas caixas influenciaram o plano de extração dos testemunhos, bem como os diâmetros dos mesmos.

Devido ao fato de não terem sido realizadas outras vistorias, em vista da falta de disponibilidade de equipe técnica e interrupção de trânsito no centro da

cidade, foi necessária a elaboração de um cronograma e plano para realização das visitas.

O cadastro foi executado mediante registro em fichas de inspeções, elaboradas em função da composição dos elementos estruturais (pilares, lajes e paredes pré-moldadas) de concreto armado, permitindo a avaliação das principais manifestações patológicas. Pelo fato das estruturas terem formatos diferentes foram utilizados dois tipos de fichas, sendo uma delas para as câmaras e a outra para as caixas.

Nas fichas cadastrais, as observações levadas em consideração, foram:

- data;
- número do transformador;
- localização e degradações em paredes, tampas e vigas.

Algumas identificações observadas nas fichas foram:

- fissuras;
- manchas;
- lascamento e destacamento de reboco;
- limo;
- umidade;
- exposição de armaduras;
- carbonatação.

Adotou-se o sentido horário a partir da entrada da câmara e/ou caixa, para verificar a ocorrência de patologias, facilitando seus registros nos croquis, conforme utilização e servicibilidade das estruturas.

Quando encontrados os sinais de prováveis patologias, iniciou-se o mapeamento destas, coleta e rastreamento das amostras, de forma a permitir a organização dos dados obtidos.

As fichas utilizadas para o levantamento cadastral estão inseridas no Apêndice A e Apêndice B e são diferenciadas conforme as estruturas de câmaras

e/ou caixas, como já citado anteriormente. Além das fichas, foram fotografadas as estruturas deterioradas para registro e auxílio no rastreamento. As fotos das principais manifestações patológicas se encontram no Apêndice C.

Exemplos de levantamento de manifestações patológicas em câmaras e caixas são mostrados na Figura 19 e na Figura 20.

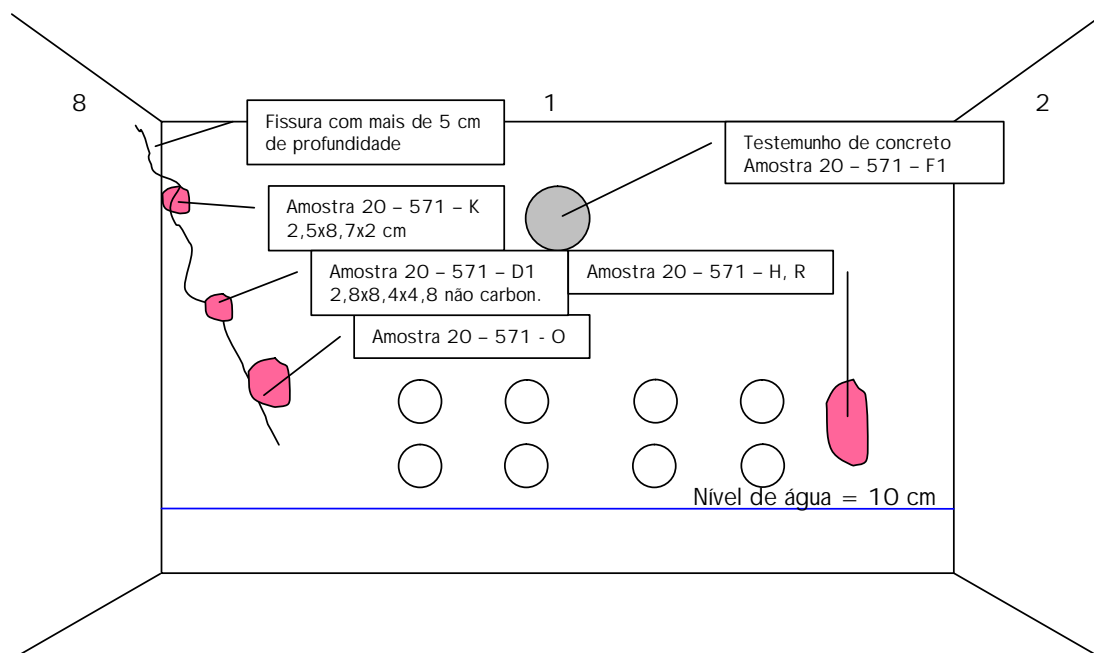


FIGURA 19 - MANIFESTAÇÕES EM CÂMARAS

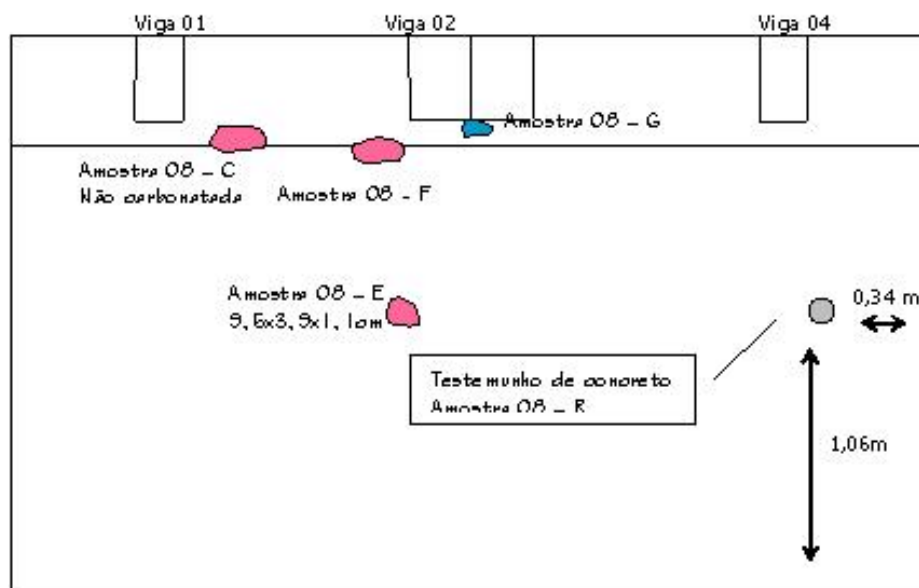


FIGURA 20 - MANIFESTAÇÕES EM CAIXAS

3.3 COLETA DE AMOSTRAS

A coleta das amostras de concreto, mediante testemunhos ou escarificações, foi obtida com a utilização de marreta, estaca e ponteira, como mostra a Figura 21.



FIGURA 21 - OBTENÇÃO DE AMOSTRA DE CONCRETO

Com o intuito de realizar ensaios, foram retiradas amostras de concreto de locais com presença de carbonatação, infiltração, lascamentos, lixiviação e corrosão de armadura.

ANDRADE (1992) recomenda que, imediatamente após a retirada do reboco, se utilize solução de 1% de fenolftaleína em álcool etílico para verificação da ocorrência de carbonatação, como ilustra a Figura 22.



FIGURA 22 - INDICADOR DE PH DO CONCRETO

Durante a aspersão da solução de fenolftaleína, se a superfície não apresentar alteração de coloração, o pH é equivalente ou inferior a 8,3. Assim sendo, deve-se continuar a escarificação e aspersão da solução no local até atingir região que apresente coloração rosa carmim, indicando a profundidade de carbonatação.

Testemunhos de concreto foram retirados em quase todas as caixas e câmaras, obtendo-se duas amostras de paredes diferentes por estrutura. Foi utilizada extratora de testemunho de concreto, como mostra a Figura 23.

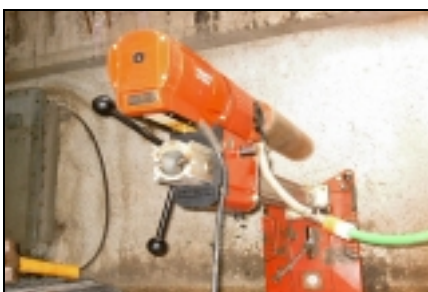


FIGURA 23 - EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHO

A retirada de testemunho foi influenciada pela presença de cabos de alta tensão e entrada de equipamento. O comprimento de cada testemunho retirado variou conforme a dimensão das paredes, e também pelo próprio processo de

extração. Eventualmente, foram retirados testemunhos com comprimento próximo de 15 cm.

Na ocasião da construção das câmaras e/ou caixas subterrâneas, foram executados reaterros com material drenante. A coleta do solo local para análise deveria transpor a espessura desses reaterros, pois estes não representam o solo da região. Entretanto, não foi possível danificar ruas e calçadas em torno das estruturas para obtenção correta do material.

O solo ou material de preenchimento de drenagem foi extraído do furo no qual foi retirado o testemunho, conforme mostra a Figura 24.



FIGURA 24 - SOLO ENCONTRADO APÓS RETIRADA DE TESTEMUNHO

O fechamento do furo de retirada de testemunho foi realizado com argamassa à base de cimento CP V - ARI com e adição de sílica ativa, elaborado *in loco* permitindo a estanqueidade da câmara e/ou caixa.

A água acumulada nas câmaras ou caixas foi coletada em recipientes plásticos de um litro, vedados e guardados em caixa térmica, de forma a evitar influência de qualquer outro fator na análise química. Observou-se que as caixas de passagem tinham maior quantidade de água no seu interior, mesmo tendo sua entrada vedada por tampa de ferro fundido. Isto se deve, provavelmente, a infiltrações pelos bocais e ausência de bomba de recalque.

Todas as extrações e coletas de amostras foram embaladas em sacos plásticos, vedados para não perder a umidade natural, posteriormente etiquetadas

com data e número diferenciando-os para cada estrutura. A Figura 25 mostra o modelo de etiqueta utilizada para mapear e cadastrar as manifestações patológicas.

Amostra Código: 01 – 553 – D
Obs.: Amostra de viga 2 da tampa da caixa.
Provável ataque por carbonatação.
Viga com exposição de armadura.
Data: 19/Jan/2003

FIGURA 25 - MODELO DE ETIQUETA PARA AMOSTRA DE CONCRETO DE VIGAS

3.4 ANÁLISE DE AMOSTRAS

As amostras de água e solo foram analisadas para verificar os teores de substâncias e elementos químicos que influenciam na deterioração das câmaras e caixas subterrâneas. E para as amostras de concreto, foi realizada MEV para análise da morfologia da pasta de cimento.

3.4.1 Água

Conforme resumido na Tabela 5 e na Tabela 6, os valores mais importantes obtidos na análise das águas encontradas nos fundos das caixas e câmaras foram: teor de sólidos, matéria orgânica, sulfatos, pH, turbidez, condutividade, cloretos, ferro, alcalinidade e dureza total.

TABELA 5 - RESULTADOS DA ANÁLISE DA ÁGUA NAS 10 CÂMARAS

VISITAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
teor de sólidos (mg/l)	487,00	-	288,00	664,00	614,00	-	766,00	541,00	1325,00	191,00
matéria orgânica (mg/l)	148,00	-	123,00	217,00	136,00	-	609,00	193,00	1079,00	37,00
sulfatos (mg/l)	17,08	-	11,54	12,55	72,85	-	3,29	19,35	24,08	24,28
pH	8,10	-	7,00	7,00	8,30	-	7,30	7,20	5,50	7,40
turbidez (FTU)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
condutividade (Ms)	-	-	-	-	659,00	-	235,00	517,00	293,00	-
cloretos (mg/l)	20,39	-	15,30	18,70	101,96	-	23,80	67,97	40,79	33,99
ferro (mg/l)	41,00	-	26,00	372,00	12,00	-	64,00	108,00	84,00	10,00
alcalinidade (mg/l)	242,97	-	60,71	40,47	286,03	-	128,26	228,69	179,08	91,85
dureza total (mg/l CaCO ₃)	170,88	-	46,28	35,60	221,61	-	117,48	172,66	88,11	90,78

TABELA 6 - RESULTADOS DA ANÁLISE DA ÁGUA NAS 10 CAIXAS

VISITAS	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
teor de sólidos (mg/l)	619,0	248,0	231,0	249,0	290,0	-	93,0	-	401,0	14,4
matéria orgânica (mg/l)	272,0	105,0	93,0	91,0	109,0	-	36,0	-	161,0	71,0
sulfatos (mg/l)	9,47	20,99	20,37	19,35	22,64	-	3,50	-	34,78	34,99
pH	6,4	6,3	6,4	7,6	7,50	-	7,3	-	7,4	7,5
turbidez (FTU)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
condutividade (Ms)	238	220	217	237	310,00	-	86	-	334	277
cloretos (mg/l)	42,49	27,20	28,90	27,20	33,99	-	17,00	-	27,20	50,98
ferro (mg/l)	264,00	12,00	6,00	16,00	6,00	-	0,00	-	4,00	14,00
alcalinidade (mg/l)	106,48	110,88	90,72	100,80	136,08	-	63,00	-	224,28	156,24
dureza total (mg/l CaCO ₃)	85,44	127,27	117,48	117,48	154,86	-	53,40	-	194,02	135,28

Estudos relacionados às amostras de água coletadas nas câmaras e caixas permitiram avaliar o grau de agressividade conforme o pH, sulfatos, cloretos e matéria orgânica encontrados.

Apesar dos valores obtidos não serem considerados agressivos, conforme mostrado na Tabela 7, os valores de pH encontrados entre 7 e 8,3 indicam a contaminação por alcalinos provenientes de infiltração (CINCOTTO, 1997). MEHTA e MONTEIRO (1994) enfatizam que qualquer meio com pH inferior ao 12,5 pode ser qualificado como agressivo, pois provocam a redução da alcalinidade desestabilizando os produtos cimentícios de hidratação.

TABELA 7 - GRAU DE AGRESSIVIDADE, FUNÇÃO DO pH E SO₃ (BAUER, 1994)

CARACTERÍSTICA	GRAU DE AGRESSIVIDADE		
	Baixo	Médio	Alto
pH	6,5 – 5,5	5,5 – 4,5	Inferior a 4,5
	Nula	Fraca	Forte
SO ₃ /litro (sulfato da água)	0 – 300	300 – 1000	Superior a 1000

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), valores superiores a 150 mg/l de SO₄ colocam em risco a integridade do concreto provocando perda progressiva de massa e resistência.

O teor de sulfatos atingiu valor médio de 21 mg/l, o qual não é considerado um valor preocupante. A água encontrada não corresponde somente às infiltrações, mas também à água livre proveniente de chuvas e escoamento pelos bocais para cabos. Cuidados devem ser tomados em relação a águas sulfatadas, carbonatadas

e residuais de outras canalizações, pois agem severamente sobre o concreto, superpondo-se aos ataques químicos, físicos e mecânicos.

Freqüentemente, a decomposição de material orgânico provoca a formação de H_2S , que em conjunto com bactérias, resulta na formação de ácido sulfúrico.

3.4.2 Solo

Todo o material retirado dos furos de testemunho foi encaminhado para o Laboratório de Minerais e Rochas - LAMIR, da Universidade Federal do Paraná – UFPR, para análise dos teores químicos. Os valores dos componentes químicos estão mostrados na Tabela 8 e na Tabela 9.

TABELA 8 - TEORES (%) QUÍMICOS DOS SOLOS I

AMOSTRA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	MgO	CaO	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO	Na ₂ O
02-60B-G	52,91	25,82	8,11	2,13	0,79	0,43	0,40	0,10	0,07	0,05	-
04-30-M	63,76	19,97	5,24	1,91	0,75	0,73	0,65	0,08	0,05	0,05	-
06-R	43,39	26,97	11,81	2,40	0,53	0,37	0,96	0,19	0,09	0,06	0,07
07-B6-V	69,69	13,81	5,51	0,56	4,91	0,21	1,41	0,32	0,05	0,11	1,81
08-J	30,16	6,81	2,07	0,27	1,26	4,92	28,46	0,10	0,15	0,05	0,16
09-O	63,78	16,47	7,73	1,41	2,49	0,76	1,39	0,54	0,27	0,10	0,63
10-O	61,65	17,76	7,08	1,26	1,59	1,30	1,73	0,15	0,04	0,08	1,01
11-J	55,21	24,15	6,51	2,15	0,97	-	1,17	-	0,09	0,06	0,17
12-R	64,89	13,81	6,32	1,04	0,55	1,31	1,60	0,05	0,05	0,04	-
13-M	63,52	17,76	7,33	1,15	1,56	1,03	1,16	0,09	0,05	0,19	0,24
14-508-B	52,72	27,89	7,01	0,90	0,35	0,30	0,64	0,17	0,09	0,03	-
15-509-N	61,09	18,67	7,26	1,33	1,79	0,71	1,23	0,16	0,07	0,10	0,29
16-252-R	67,91	14,66	4,57	1,41	1,49	0,76	3,22	0,19	0,10	0,07	0,40
17-244-X	73,53	9,69	4,19	1,17	1,93	1,06	3,95	0,26	0,20	0,10	0,84
706-I	66,92	13,74	4,95	1,13	1,85	0,56	3,82	-	0,09	0,06	0,37
655-E	51,96	25,79	9,64	1,93	0,80	0,31	1,01	0,20	0,08	0,07	0,18
571-Q	9,09	1,55	44,97	0,11	0,14	0,55	16,54	0,47	0,21	1,15	-

TABELA 9 - TEORES (%) QUÍMICOS DOS SOLOS II

AMOSTRA	Ba	Zr	Sr	Cr	Cl	Zn	Ni	Cu	Pb	Co	I	Rb	PF
02-60B-G	0,04	0,04	0,01	0,02	-	-	0,01	-	-	-	-	-	9,08
04-30-M	0,05	0,09	-	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	6,6
06-R	0,04	0,04	-	-	-	-	0,01	-	0,02	-	-	-	13,06
07-B6-V	0,26	0,04	0,03	-	-	0,01	-	-	-	-	-	-	1,27
08-J	-	0,02	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25,56
09-O	0,17	0,04	0,02	0,02	0,04	0,01	-	-	-	-	-	-	4,14
10-O	0,10	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01	-	-	-	-	-	0,03	6,10
11-J	-	0,04	0,03	0,02	-	0,01	-	0,01	-	-	-	-	9,41
12-R	0,04	0,03	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,27
13-M	-	0,02	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,90
14-508-B	-	0,03	0,06	-	-	-	-	-	0,01	-	-	-	9,79
15-509-N	0,07	0,03	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,16
16-252-R	0,08	0,03	0,02	0,04	-	-	-	-	-	0,01	-	-	5,06
17-244-X	-	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	-	0,01	-	0,02	-	-	2,98
706-I	-	0,03	0,02	0,02	0,03	-	-	-	-	-	-	-	6,42
655-E	0,05	0,03	0,02	-	0,03	0,01	-	-	-	-	-	-	7,90
571-Q	-	-	0,04	-	0,04	0,01	-	-	-	-	0,40	-	24,73

Valores superiores a 0,1% de sulfato solúvel em solos representam perigo às estruturas, pois reagem com o concreto formando produtos expansivos. Conforme HELENE (1993), O limite de teor de cloretos para despassivar o aço embutido no concreto é considerado pelo autor equívale a 0,05%. Observa-se que a amostra do solo da caixa 16 apresenta valor inferior, porém, próximo ao especificado como limite. Considera-se irrelevante os teores químicos obtidos.

3.4.3 Concreto

A preparação das amostras de concreto para realização de análises através de microscópio eletrônico de varredura (MEV) com o auxílio de espectrômetro por energia dispersiva (EDS), foi realizada a partir de pedaços do reboco e concreto retirados das estruturas. Detalhes encontrados nas amostras analisadas podem ser observados entre a Figura 26 e Figura 31. Outras ilustrações de MEV podem ser visualizadas no Apêndice D.

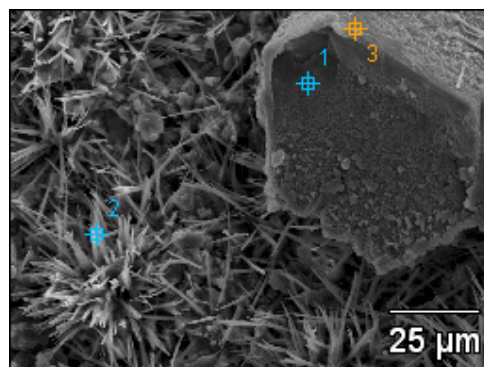


FIGURA 26 - CRISTAIS DE ETRINGITA E HIDRÓXIDO DE CÁLCIO EM TESTEMUNHO

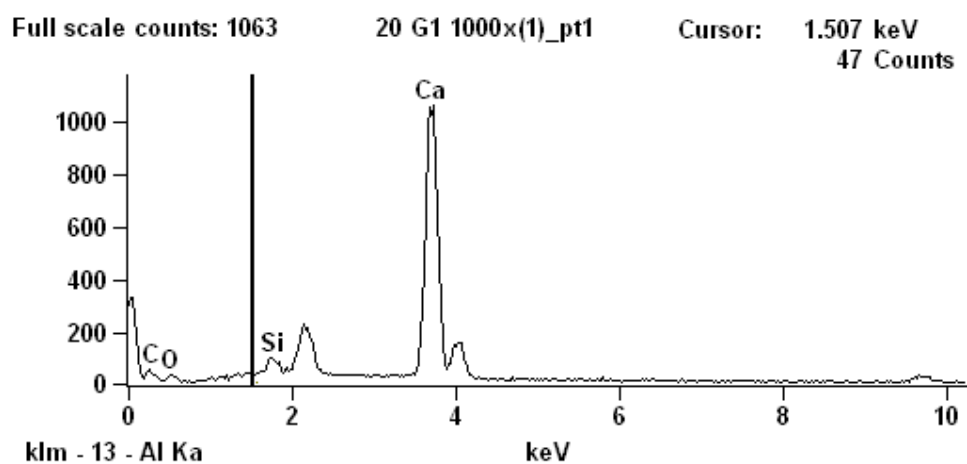


FIGURA 27 - ESPECTRÔMETRO FIG. 26, PONTO 1 – ALTA CONCENTRAÇÃO DE CÁLCIO

A Figura 27 indica elevado teor de cálcio para a amostra analisada.

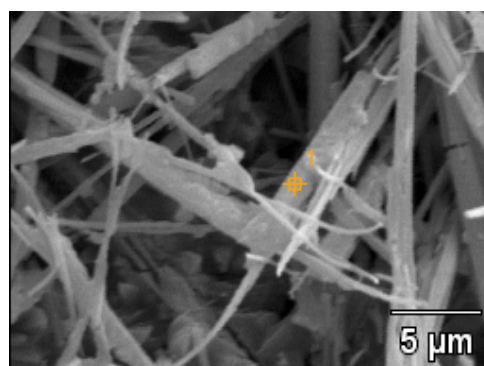


FIGURA 28 - ETRINGITA EM AMOSTRA DE TESTEMUNHO

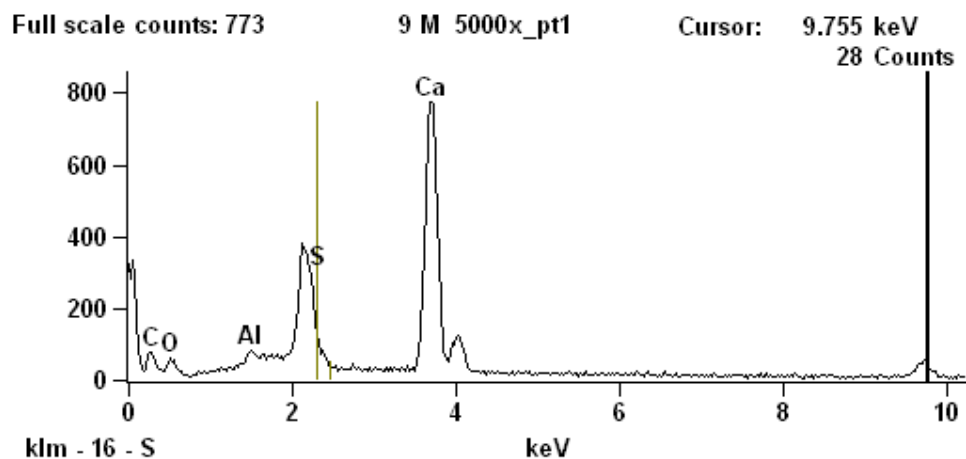


FIGURA 29 - ESPECTRÔMETRO FIG. 28, PONTO 1 – ALTA CONCENTRAÇÃO DE CÁLCIO

A Figura 29 indica elevado teor de cálcio e enxofre, compostos da etringita.

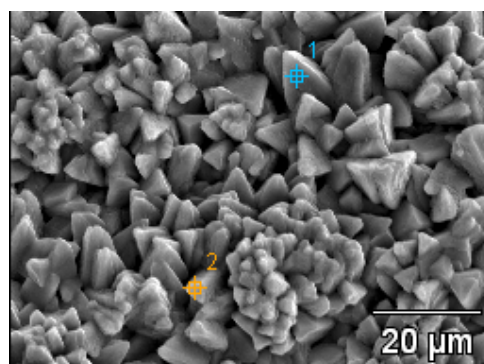


FIGURA 30 - FORMAÇÃO DE CRISTAIS DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO EM TESTEMUNHO

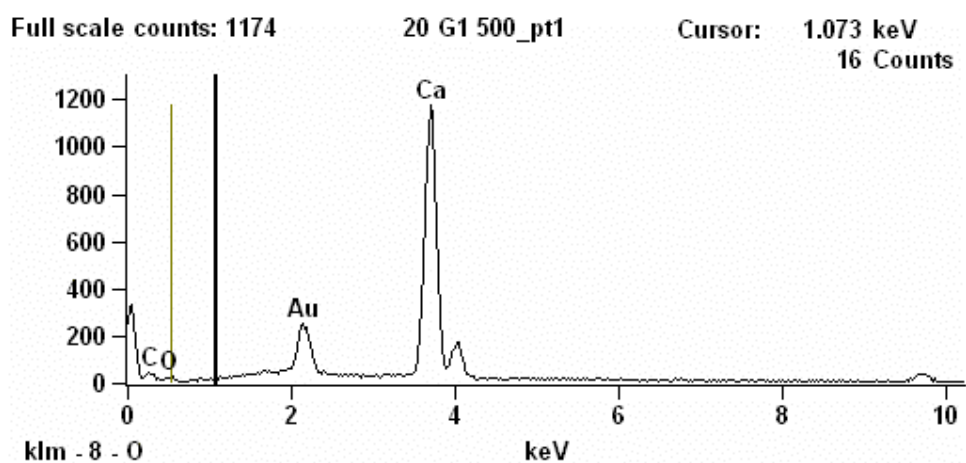


FIGURA 31 - ESPECTRÔMETRO FIG. 30, PONTO 1 – ALTA CONCENTRAÇÃO DE CÁLCIO

A Figura 30 indica elevado teor de cálcio e também a presença de ouro utilizado no processo da metalização da amostra de concreto.

3.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES DE TESTEMUNHOS

A extração de testemunhos foi realizada a uma altura média de 1 m do piso e distanciada da parede lateral de 60 cm. Isto foi adotado por se tratar de região com menor número de armaduras. A broca rotativa de diâmetro 100 mm esteve sempre disposta na direção ortogonal da parede, conforme solicitado pela NBR 7680/83.

Devido às dificuldades decorrentes da passagem de cabos de energia elétrica e da falta de espaço para operação da extratora, foram extraídos somente dois testemunhos por câmara e/ou caixa.

Para ensaiar os testemunhos à compressão axial, realizou-se inicialmente o corte da base e do topo dos CPs, utilizando serra circular com disco de corte diamantado. Os CPs apresentaram diversas alturas, devido a problemas com a extração ou espessura de parede inferior à especificada no projeto ($h = 15$ cm), mostrado na Figura 32.



FIGURA 32 - CPS COM ALTURAS DIFERENTES

Tendo em vista que a relação altura/diâmetro (h/d) resultou inferior ao estabelecido pela NBR 7680/83, optou-se pela utilização de dois métodos para a avaliação da resistência à compressão axial. Nos testemunhos com relação h/d superior a dois, não foi utilizado fator de correção. Já para relação h/d inferior a dois, foi aplicado o fator de correção.

Conforme estabelecido pela NBR 5738/94, é necessário arrematar a base e o topo do corpo-de-prova (CP), capeando-as com mistura à base de enxofre. A ruptura dos testemunhos seguiu os procedimentos estabelecidos na NBR 5739/94, cujos resultados estão apresentados na Tabela 10.

TABELA 10 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RC DE TESTEMUNHOS DE CONCRETO

Amostra	Ø (mm)	Altura (mm)	Altura após Capeado (mm)	Fator de Correção	Carga de Ruptura (kgf)	Tensão de Ruptura (MPa)
02 - I	95,00	150,00	150,00	0,93	25,10	32,30
02 - J	75,00	120,00	126,00	0,93	9,93	20,50
03 - I	94,60	126,00	126,00	0,89	19,61	24,30
03 - H	75,00	88,00	92,00	0,89	11,31	22,30
04 - K	94,60	151,00	151,00	0,93	32,60	42,30
04 - G	75,00	128,00	133,00	0,97	20,77	44,70
05 - E	95,00	125,00	128,00	0,89	39,40	48,50
06 - O	95,00	50,00	50,00	0,50	35,21	24,40
06 - P	75,00	78,00	82,00	0,83	27,71	51,10
07 - X	104,00	127,00	132,00	0,89	30,97	31,80
07 - Y	75,00	150,00	155,00	1,00	19,36	43,10
08 - R	103,00	150,00	153,00	0,93	45,46	49,80
08 - I	75,00	164,00	169,00	1,00	18,94	42,00
09 - U	103,00	150,00	150,00	0,93	22,83	25,00
09 - T	75,00	143,00	147,00	1,00	22,25	49,40
10 - W	104,00	201,00	204,00	1,00	21,72	25,10
10 - Y	75,00	193,00	200,00	1,00	11,59	25,70
11 - X	104,00	203,00	207,00	1,00	39,35	45,40
11 - Z	75,00	143,00	146,00	1,00	8,83	18,60
12 - U	105,00	149,00	153,00	0,93	29,48	31,10
12 - V	75,00	210,00	212,00	1,00	11,91	26,40
13 - U	105,00	175,00	180,00	0,97	33,21	36,50
13 - V	75,00	198,00	203,00	1,00	13,30	29,50
14 - X	105,50	174,50	174,50	0,97	46,81	50,90
14 - Z	75,00	165,00	169,00	1,00	15,63	34,70
15 - X	106,00	125,00	131,00	0,89	34,05	33,70
15 - Z	75,00	152,00	155,00	1,00	18,48	41,00
16 - U	104,00	152,00	154,00	0,93	43,22	46,40
16 - T	75,00	150,00	155,00	1,00	15,42	34,20
17 - W	104,00	150,00	150,00	0,93	20,85	22,40
17 - Z	75,00	100,00	102,00	0,89	18,80	37,10
18 - Z	103,00	151,00	154,00	0,93	16,88	18,50
18 - X	75,00	148,00	152,00	1,00	8,48	18,80
19 - T	102,00	152,00	153,00	0,93	32,56	36,30
19 - U	100,00	41,00	47,00	0,50	47,29	29,50
20 - F1	104,00	150,00	155,00	0,93	39,35	42,30
20 - G1	75,00	95,00	99,00	0,89	10,22	20,00

Com os resultados de resistência à compressão axial apresentados acima, observa-se que a câmara da visita nº. 6 foi identificada como a de maior valor e a

caixa nº. 18 com a resistência de menor valor. Na média observou-se um valor equivalente a 33,94 MPa superior ao previsto em projeto (20 MPa). Para a caixa nº11 e nº18 apresentaram valores inferiores a 20 MPa.

Verificou-se que para CPs com diâmetro equivalente a 75 mm foi obtida em média a tensão de ruptura inferior aos CPs com diâmetro maior.

Observa-se também, que para as câmaras subterrâneas obteve-se, na média, maior resistência comparada às caixas subterrâneas.

3.6 PRINCIPAIS MANIFESTAÇÕES DE CÂMARAS E CAIXAS

As manifestações patológicas encontradas em câmaras e caixas subterrâneas são geralmente iniciadas pela má execução combinada com a influência da água que circunda a estrutura permeável. A presença da água, que reage como catalisador em contato com alguns componentes do concreto, promove a deterioração acelerada da estrutura, contribuindo com o processo de degradação.

Além da umidade, infiltrações e presença de ar, em câmaras com transformadores, há também elevada temperatura gerada pelo equipamento. Conforme ANDRADE e DAL MOLIN (1997), altas temperaturas atuam como fator que aumenta a velocidade das reações químicas, especialmente no caso de corrosão de armadura. A durabilidade de estruturas de concreto é caracterizada pelo entorno, pois as manifestações patológicas ocorrem pela influência da umidade, variações de temperatura e concentração de poluição na atmosfera.

Em função das fichas e arquivos fotográficos, as manifestações patológicas observadas em câmaras e caixas foram catalogadas, como mostrado no Quadro 2 e no Quadro 3.

QUADRO 2 - MANIFESTAÇÕES NAS CÂMARAS

CÂMARAS				
VISITA Nº.	COPEL Nº.	ENDEREÇO	DATA VISITA	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS OBSERVÁVEIS
01	553	Rua José Loureiro esquina com a Rua Barão do Rio Branco.	19/02/03	Exposição de armadura em paredes. Carbonatação em vigas da tampa. Fissuras e destacamento de reboco em paredes. Presença de fissuras e manchas em tampas e paredes. Umidade e limo localizados em todas as paredes.
02	60	Rua Desembargador Westphalen esquina com a Rua Pedro Ivo.	08/04/03	Eflorescências nas vigas das tampas. Fissuras com destacamento de reboco. Corrosão de armaduras em vigas das paredes.
03	574	Rua Lourenço Pinto com a Pedro Ivo	03/06/03	Carbonatação em vigas de tampa e de parede. Infiltrações nas paredes. Desagregação da parede com infiltração localizada na base da parede. Limo, umidade e fissuras nas vigas da tampa. Umidade presente em todas as paredes da estrutura inclusive na tampa.
04	30	Praça Osório	05/06/03	Fissuras na base da viga em sentido longitudinal. Fissuras nas tampas. Manchas esbranquiçadas nas tampas e vigas. Armadura exposta em viga da tampa. Umidade em paredes e vigas e tampa. Carbonatação em paredes e vigas.
05	31	Praça Osório	15/06/03	Carbonatação em viga. Manchas na tampa e vigas. Umidade em vigas das paredes. Estribo saindo da viga da parede.
06	-	Rua Marechal Floriano esquina com a Rua Pedro Ivo	23/06/03	Manchas, limo e armaduras expostas nas tampas. Vigas da tampa com carbonatação.
07	6	Rua Cruz Machado esquina com Alameda Cabral	29/06/03	Exposição de armadura na tampa da câmara e na viga da parede. Manchas nas vigas e tampa da câmara. Infiltração proveniente dos dutos para passagem de cabos de alta e baixa tensão.
08	-	Rua Barão do Cerro Azul esquina com Rua Paula Gomes	05/09/03	Inchamento na parede com destacamento de reboco. Armadura exposta na tampa devido à má execução de concretagem. Armadura exposta em vigas de paredes.
09	15	Rua Carlos de Carvalho esquina com Rua Voluntários da Pátria	12/09/03	Tampa muito úmida devido inundação da caixa. Infiltrações de cores diferentes nas paredes destinadas à passagem de cabos.
10	-	Travessa da Lapa esquina com a Rua José Loureiro	19/09/03	Amostra fácil de ser retirada. Carbonatação em vigas e paredes. Tampa com exposição de armadura por má execução da estrutura.

QUADRO 3 - MANIFESTAÇÕES NAS CAIXAS

CAIXAS				
VISITA Nº.	COPEL Nº.	ENDEREÇO	DATA VISITA	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS OBSERVÁVEIS
11	309	Rua Senador Alencar Guimarães esquina Rua Emiliano Perneta.	26/09/03	Exposição e corrosão de armadura. Paredes com concreto fissurado, desagregado e lixiviado abaixo do nível de água encontrado no dia da visita. Paredes com bastante infiltração localizada nas aberturas destinadas à passagem de cabos. Presença de microorganismos no concreto ao redor das aberturas com infiltração. Manchas em paredes devido à presença de umidade e limo.
12	42	Rua Desembargador Ermelino de Leão com Rua Augusto Stelfeld.	03/10/03	Armadura exposta na tampa. Presença de umidade e limo em todas as paredes. Manchas esbranquiçadas em duas paredes.
13	-	Rua Desembargador Ermelino de Leão com Rua Augusto Stelfeld	03/10/03	Infiltrações nas paredes. Carbonatação em pouca extensão da tampa. Parede com amostra de concreto facilmente retirado. Aparecimento de carbonatação em paredes. Aparecimento de manchas, limo e umidade em paredes, especialmente nas áreas abaixo do nível de água bombeado.
14	508	Largo da Ordem	10/10/03	Armadura exposta em diversos locais da tampa. Manchas de limo e umidade nas paredes.
15	509	Largo da Ordem	10/10/03	Tampa com infiltração e umidade, armadura exposta na tampa, com expansão e corrosão, sem presença de carbonatação. Desagregação e lixiviação de argamassa nas paredes, abaixo do nível de água. Manchas de limo e umidade nas paredes.
16	252	Rua Ébano Pereira	24/10/03	Espaçamento entre tampa e paredes. Manchas e limo nas paredes.
17	244	Praça Osório	24/10/03	Parede com camada extremamente fina de concreto, contendo brita sem argamassa.
18	706	Rua Barão do Rio Branco	31/10/03	Material orgânico proveniente da abertura para passagens de cabos. Fissuras em grande extensão e profundidade.
19	655	Rua Monsenhor Celso esquina com Rua Marechal Deodoro	31/10/03	Nichos de concreto em todas as paredes. Exposição de armadura. Tampa com excesso de umidade. Infiltrações de cores diferentes nas paredes destinadas à passagem de cabos.
20	571	Rua Moreira Garcez esquina com Rua Tobias Macedo	07/11/03	Corrosão da tampa em grande extensão com destacamento do reboco em peças sem presença de carbonatação. Fissuras em paredes com grande extensão e profundidade. Carbonatação em paredes.

As manifestações patológicas encontradas estão mostradas na Figura 33 e Figura 34.

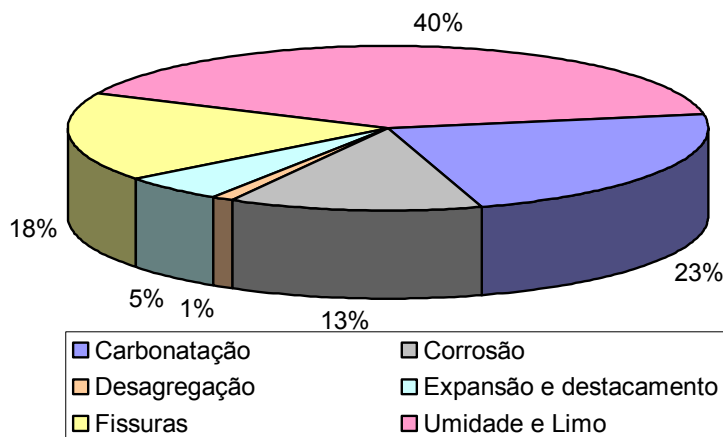


FIGURA 33 - PRINCIPAIS MANIFESTAÇÕES EM CÂMARAS

Apesar de que nas câmaras verificou-se maior incidência de umidade e limo, pode-se considerar a carbonatação como principal manifestação patológica. A presença de ar e entrada de água pelas grades de ventilação, em conjunto com o calor gerado pelo transformador, proporcionam o ambiente propício para o aparecimento destas manifestações.

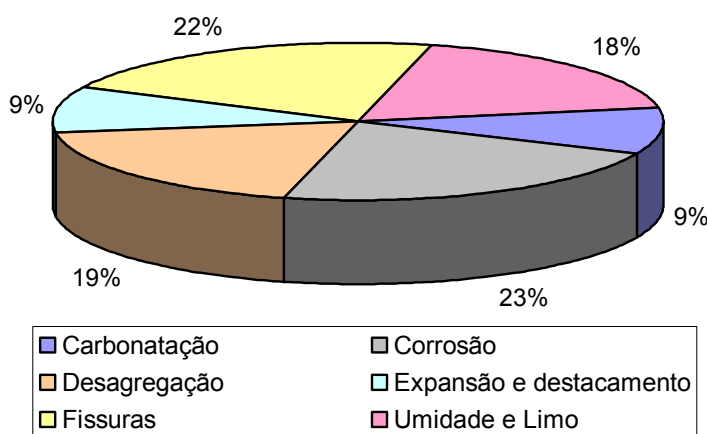


FIGURA 34 - PRINCIPAIS MANIFESTAÇÕES EM CAIXAS

Em caixas subterrâneas, verificou-se a maior incidência de corrosão de armadura. A presença constante de água acumulada nestas caixas proporciona ambiente ideal para tais manifestações.

As principais causas que reduzem a durabilidade das câmaras e caixas de passagem, são:

- fissuras;
- corrosão de armaduras;
- eflorescências;
- destacamento de reboco.

Outro fator que contribui para a deterioração das estruturas subterrâneas é a falta de cobrimento das armaduras, cujos valores são especificados na NBR 6118/03. A Tabela 11 resume a classificação das câmaras e caixas, em relação à esta Norma.

TABELA 11 - CLASSIFICAÇÃO DE ESTRUTURAS (NBR 6118/03)

CARACTERÍSTICA	CLASSIFICAÇÃO
macro-clima	solo
micro-clima	úmido ou com ciclos de molhagem e secagem
classe de agressividade ambiental	IV
agressividade	muito forte
risco de deterioração	elevado

Em consequência desta classificação, as estruturas de câmaras e caixas subterrâneas devem possuir os seguintes parâmetros:

- relação $a/c \leq 0,45$;
- classe do concreto armado $\geq C40$;
- cobrimento mínimo para laje = 45 mm;
- cobrimento mínimo para viga e pilar = 50 mm.

Verificando-se os projetos, análise da resistência de testemunhos e inspeção dos elementos estruturais de câmaras e caixas, pode-se considerar que nenhum item estipulado pela Norma foi observado, expondo a estrutura a riscos de deterioração acentuados.

As fichas de avaliação com o mapeamento das diversas manifestações associadas à realização de ensaios, permitem diagnosticar problemas nas estruturas e realizar projeto de reparo ou reforço adequado a cada patologia encontrada.

Foi possível observar a diminuição da resistência do concreto endurecido, bem como problemas na integridade do material devido às reações químicas, como lixiviação da pasta de cimento endurecida e expansão provocada pelas novas combinações. Estes problemas podem estar relacionados à má concepção do projeto estrutural, a composição dos materiais, a ausência de estudo de drenagem, bem como a falta de manutenção preventiva e reparos.

A falta de critérios de execução e a má disposição das peças estruturais acarretam a maior deterioração das câmaras e caixas subterrâneas. E os sintomas observados nas inspeções geralmente são lesões em estado avançado.

Processos de molhagem e secagem como os que ocorrem nas estruturas subterrâneas, bem como o aumento de temperatura (resultante do funcionamento dos transformadores de energia), criam um ambiente propício ao aparecimento de fatores que provocam diminuição da durabilidade e resistência do concreto.

A conscientização por parte dos executores, projetistas e usuários das estruturas subterrâneas em relação à necessidade de utilização de novas técnicas de construção, fiscalização e manutenção de peças projetadas para resistir às ações de agentes agressivos externos é necessária para a adequada durabilidade destas estruturas.

Supervisão, controle e proteção das estruturas, bem como cuidados na elaboração do concreto, permitem obter um material mais durável e resistente à ação do meio ambiente agressivo. A necessidade de tratamentos químicos pode ser considerada como opção de reparo e reforço destas estruturas.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 OBJETIVO

O programa experimental tem como objetivo a análise do desempenho de sistemas de reparo adequados e resistentes a ambientes agressivos, nos quais se encontram as câmaras e caixas subterrâneas.

As argamassas avaliadas em laboratório foram: argamassas com adição de nitrito de sódio (inibidor de corrosão), sílica ativa (adição mineral), estireno-butadieno (polímero) e argamassas comerciais do Tipo 1 ao Tipo 7. A descrição das argamassas comerciais é apresentada como segue:

- Tipo 1 - graute de elevada resistência inicial e final, à base de cimento de alta resistência inicial;
- Tipo 2 - argamassa seca, composta basicamente de cimento e aditivos;
- Tipo 3 - argamassa com adição de polímeros à base de emulsão acrílica e cimento;
- Tipo 4 - graute não retrátil de alta precisão;
- Tipo 5 - argamassa para grauteamento, composta de argamassa cimentícia, isenta de cloretos e componentes metálicos;
- Tipo 6 - argamassa polimérica de alto desempenho à base de cimento, aditivos, polímeros acrílicos e agregados selecionados;
- Tipo 7 - argamassa de alta resistência inicial e final, à base de cimento e aditivos especiais.

A Figura 35 apresenta o preparo da argamassa com adição de sílica ativa.



FIGURA 35 - ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA

Considerando a avaliação dos sistemas de reparos frente à resistência e permeabilidade, os ensaios realizados para verificar a eficiência das argamassas foram:

- ensaios de caracterização dos materiais utilizados;
- ensaios de resistência à compressão axial (NBR 5739/94) e resistência à tração na flexão (NBR 12142/92);
- ensaios de absorção por imersão (NBR 9778/87), absorção por capilaridade (NBR 9779/95) e absorção de água por sucção capilar proposto por KHELAM (1988).

Segundo CABRAL (2000), as proporções ideais de cada componente das argamassas de sistemas de reparos de cimento e areia no traço 1:3 em massa e adições, são:

- 10% da massa de cimento para o teor de sílica ativa;
- 2% da massa de cimento para adição de nitrito de sódio;
- 20% da massa de cimento para o polímero estireno-butadieno.

Foram utilizados 4 tipos de cimento e 3 relações a/c (0,45, 0,50 e 0,55). Para cada relação a/c e consumo de cimento utilizou-se superplastificante nas argamassas, obtendo-se assim a consistência desejada.

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

4.2.1 Cimento

Para a realização das argamassas foram utilizados 4 tipos de cimentos encontrados na região de Curitiba:

- CP II F - 32 (*filler* calcário);
- CP II Z - 32 (com adição de pozolanas);
- CP IV - 32 (cimento portland pozolânico) e
- CP V - ARI (alta resistência inicial).

Estes cimentos são provenientes de mesmo lote e fornecidos em sacos de 50 kg. Os cimentos têm suas características químicas e físicas e resistência à compressão mostradas na Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14, sendo que estes valores foram obtidos com o fabricante.

TABELA 12 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS CIMENTOS

TIPO CIMENTO	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Perda ao Fogo (%)	CaO livre (%)	Res. Insol. (%)	Equiv. Alc. (%)
CP II F - 32	4,30	17,57	2,52	60,26	5,12	2,91	5,47	1,96	1,15	0,59
CP II Z - 32	6,95	21,34	3,15	51,55	5,26	3,04	5,79	1,40	14,21	0,76
CP IV - 32	11,60	32,12	3,29	41,84	4,15	2,82	3,98	0,67	34,91	0,85
CP V - ARI	4,21	18,15	2,50	60,55	5,06	3,14	3,71	1,63	0,93	0,57

TABELA 13 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS CIMENTOS

TIPO CIMENTO	Exp. a quente (mm)	Tempo Início Pega (h:min)	Tempo Fim Pega (h:min)	Cons. Normal (%)	Blaine (cm ² /g)	Finura peneira # 200 (%)	Finura peneira # 335 (%)
CP II F - 32	0,50	3:00	3:45	25,80	3,48	3,00	14,10
CP II Z - 32	0,50	3:40	4:30	27,40	3,94	1,80	9,60
CP IV - 32	0,00	3:30	4:15	31,10	4,45	0,60	2,50
CP V - ARI	0,50	3:00	3:45	29,70	4,57	0,07	0,80

TABELA 14 - RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DOS CIMENTOS

TIPO CIMENTO	MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)			
		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
CP II F - 32	3,09	13,50	26,70	33,70	41,10
CP II Z - 32	2,97	9,80	20,10	28,90	38,70
CP IV - 32	2,82	8,40	19,70	25,90	38,20
CP V - ARI	3,12	24,90	36,30	42,10	50,10

4.2.2 Agregado Miúdo

As dosagens foram realizadas com areia de origem natural quartzosa, proveniente de jazidas de rios de regiões próximas à Curitiba. O material continha diversas impurezas como folhas, torrões de argilas e outros detritos. Antes de se utilizar a areia, a mesma foi previamente seca ao ar livre, obtendo-se um teor de umidade menor ou equivalente a 0,1%.

A elaboração de argamassas com a areia contaminada por detritos e sem estabelecer limites de granulometria, deve-se à necessidade de se efetuar reparos com materiais comercialmente vendidos na região.

A Tabela 15 apresenta resultados da composição granulométrica de duas amostras de areia, A1 e A2, conforme a NBR NM 248/2003.

TABELA 15 - GRANULOMETRIA AGREGADO MIÚDO

MASSA DA AMOSTRA	500 g	AGREGADO MIÚDO - A1		500 g	AGREGADO MIÚDO - A2	
ABERTURA DA PENEIRA (mm)	MASSA RETIDA (g)	% RETIDA		MASSA RETIDA (g)	% RETIDA	
		INDIVIDUAL	ACUMULADA		INDIVIDUAL	ACUMULADA
4,8	12,62	2,52	2,52	13,75	2,75	2,75
2,4	63,73	12,75	15,27	56,38	11,28	14,03
1,2	81,06	16,21	31,48	77,84	15,57	29,59
0,6	72,11	14,42	45,90	72,86	14,57	44,17
0,3	85,4	17,08	62,98	86,98	17,40	61,56
0,15	118,41	23,68	86,67	122,56	24,51	86,07
<0,15	66,51	13,30	99,97	67,66	13,53	99,61
TOTAL	499,84	MÓDULO DE FINURA 2,45		498,03	MÓDULO DE FINURA 2,38	

A Figura 36 apresenta a curva granulométrica de cada amostra, onde se verifica a semelhança nos resultados.

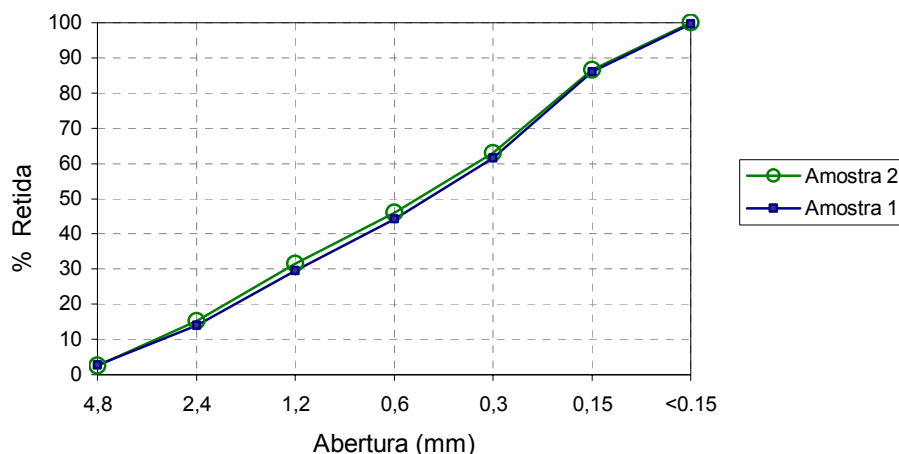


FIGURA 36 - CURVA GRANULOMÉTRICA DA AREIA

A caracterização do agregado miúdo está apresentada na Tabela 16

TABELA 16 - CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO

CARACTERÍSTICA	RESULTADOS	MÉTODO DE ENSAIO	LIMITES NBR 7211/83
Dimensão Máxima Característica (mm)	4,8	NBR NM 248/2003	-
Módulo de Finura	2,45	NBR NM 248/2003	-
Graduação (Zona)	3	NBR NM 248/2003	3 (média)
Massa Específica SSS (g/cm ³)	2,63	NBR 9776/87	-
Massa Específica Seca (g/cm ³)	2,61	NBR 9776/87	-
Massa Unitária Solta (g/cm ³)	1,51	NBR 7251/82	-
Absorção (%)	0,42	NBR 9777/87	-
Material Pulverulento (%)	2,48	NBR 7219/87	0,5 a 3,0

4.2.3 Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada é proveniente de mesmo lote e embalada em sacos de 15 kg. Este material é do tipo densificado e algumas características são mostradas na Tabela 17.

TABELA 17 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA SA

CARACTERÍSTICA	VALORES OBTIDOS
Massa Específica (g/cm ³)	2,07
Superfície Específica (m ² /g)	2,20
Diâmetro equivalente a 10% de massa acumulada (µm)	4,42
Diâmetro equivalente a 90% de massa acumulada (µm)	20,80
Diâmetro Médio das Partículas (µm)	12,40

A Tabela 18 mostra a caracterização química da sílica ativa, determinada por espectroscopia de fluorescência de raios-X. A superfície específica foi obtida por meio de análise por adsorção de nitrogênio.

TABELA 18 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA SA

COMPOSIÇÃO	TEOR OBTIDO (%)
Perda ao Fogo	3,35
SiO ₂	93,54
Al ₂ O ₃	0,07
Fe ₂ O ₃	0,05
CaO	0,01
K ₂ O	0,80
Na ₂ O	0,12
MgO	0,53
MnO	0,02
TiO ₂	0,04
P ₂ O ₅	0,09

A distribuição granulométrica da sílica ativa foi determinada por meio de granulômetro a Laser, como ilustra a Figura 37.

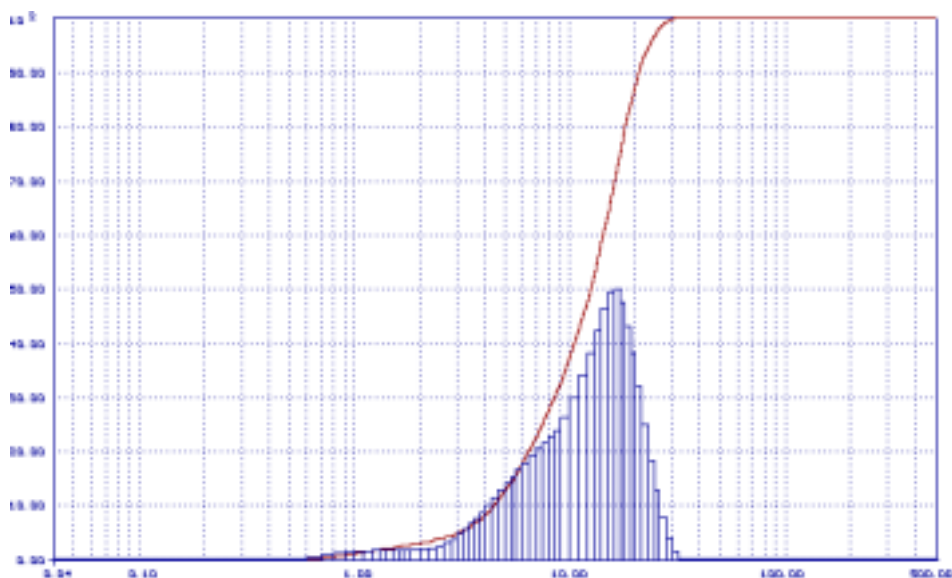


FIGURA 37 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA SA

4.2.4 Nitrito de Sódio

Utilizou-se nitrito de sódio (NaNO_2) como aditivo que promove proteção contra à corrosão de barras de aço.

4.2.5 Estireno-Butadieno

O estireno-butadieno (SBR) foi utilizado como polímero modificador de argamassa visando melhorar sua aderência. A massa específica do produto utilizado é de $1,050 \text{ kg/dm}^3$ e pH alcalino.

4.2.6 Aditivo

O aditivo utilizado foi um superplastificante de última geração com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado. Sua densidade pode variar de $1,067$ a $1,107 \text{ kg/dm}^3$, pH entre 5 e 7, e teor de sólidos entre 28,5 e 31,5%. Este aditivo proporciona maior fluidez à argamassa, sem alterar a relação a/c, mantendo a consistência desejada para moldagem de CPs.

4.2.7 Água de Amassamento

Para a execução das argamassas foi utilizada água potável proveniente do abastecimento da rede pública de distribuição.

4.2.8 Argamassas Comerciais

Além das argamassas com adições, avaliaram-se 7 tipos de argamassas encontradas no comércio, denominadas argamassas Tipo 1 ao Tipo 7.

A argamassa Tipo 1 é um graute de uso geral e de elevada resistência inicial e final. É indicado para grauteamento de áreas de difícil acesso, preenchimento e reparos em áreas confinadas. Possui também alta aderência, durabilidade e baixa porosidade. Este graute é composto por água, cimento de alta resistência inicial, agregados com granulometria específica e aditivos plastificantes.

A argamassa Tipo 2 é uma argamassa seca de elevada resistência inicial e final. É indicada para revestimentos e reparos de estruturas de concreto. Tem boa aderência, impermeabilidade e apresenta baixa retração. É composta de cimento e aditivos.

A argamassa Tipo 3 é uma argamassa bi-componente modificada com polímeros. É indicada para recuperação estrutural, revestimentos e reparos em concreto. Sua principal característica é a consistência tixotrópica podendo ser aplicada em superfícies verticais e horizontais. É composta por emulsão acrílica e cimento.

A argamassa Tipo 4 é um graute não retrátil. Este material pode ser aplicado em grauteamento de painéis, vigas e elementos pré-fabricados, em locais de difícil acesso, bem como em reparos de defeitos em estruturas de concreto com altas resistências. Possui resistência inicial e final elevada, boa aderência, baixa permeabilidade e pode ser utilizada em reparos rápidos.

A argamassa Tipo 5 é uma argamassa autonivelante para grauteamentos em geral. É recomendada para espaços confinados. Tem como característica principal o fato de ser autonivelante, além de apresentar elevada resistência inicial e final, resistência à tração e ao arrancamento. Esta argamassa cimentícia é isenta de cloretos e componentes metálicos.

A argamassa Tipo 6 é uma argamassa polimérica bi-componente de alto desempenho. Utilizada em reparos, revestimentos de superfícies de concreto, reforço permanente e reconstituição de componentes estruturais de concreto. Tem resistência superior às argamassas convencionais e poliméricas e excelente aderência. É um material tixotrópico de fácil aplicação em superfícies verticais e horizontais, retração compensada, impermeabilidade e durabilidade.

A argamassa Tipo 7 é uma argamassa de alta resistência inicial e final. Indicada para aplicação em recuperação estrutural e grauteamento de pré-moldados de concreto armado ou protendido. Esta argamassa, além de impermeável,

apresenta resistência a óleos minerais, resistência à fadiga por variação de temperatura e vibrações. É composta por cimento e aditivos.

A Tabela 19 mostra os valores de resistência à compressão, em 4 idades, dos produtos comerciais citados.

TABELA 19 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS COMERCIAIS

ARGAMASSA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)			
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Tipo 1	30	49	57	70
Tipo 2	20	-	-	70
Tipo 3	-	25	-	55
Tipo 4	-	20	-	40
Tipo 5	22	38	-	50
Tipo 6	20	-	-	42
Tipo 7	5	20	-	50

4.3 TRAÇOS

Para a identificação das dosagens, foi estipulada uma convenção numérica para cada traço, em função do tipo de cimento, relação a/c e tipo de adição. Foram dosados 36 traços de argamassas de cimento e areia, 1:3 em massa, com relação a/c (0,45 – 0,50 – 0,55), para os quatro tipos diferentes de cimento (CP II F - 32, CP II Z - 32, CP IV - 32 e CP V - ARI), conforme mostrado na Tabela 20, Tabela 21 e Tabela 22.

TABELA 20 - TRAÇO PARA ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE SA

QUANTIDADES					SA 10%
a/c	CP II F	CP II Z	CP V	CP IV	
0,45	1	2	3	4	
0,50	5	6	7	8	
0,55	9	10	11	12	1:3

TABELA 21 - TRAÇO PARA ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE NS

QUANTIDADES					NS 2%
a/c	CP II F	CP II Z	CP V	CP IV	
0,45	13	14	15	16	
0,50	17	18	19	20	
0,55	21	22	23	24	1:3

TABELA 22 - TRAÇO PARA ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE EB

QUANTIDADES					
a/c	CP II F	CP II Z	CP V	CP IV	
0,45	25	26	27	28	EB 20%
0,50	29	30	31	32	
0,55	33	34	35	36	
					1:3

Foram realizadas as misturas de 7 argamassas comerciais conforme a Tabela 23. O traço 65 foi desconsiderado, pois é o mesmo material empregado na dosagem do traço 66.

TABELA 23 - TRAÇO CORRESPONDENTE A CADA ARGAMASSA COMERCIAL

NOME	NÚMERO
Tipo 1	61
Tipo 2	62
Tipo 3	63
Tipo 4	64
Tipo 5	65
Tipo 5	66
Tipo 6	67
Tipo 7	68

Definidos os traços, calcularam-se as proporções de cada material para as dosagens necessárias. A Tabela 24, Tabela 25 e Tabela 26 indicam as quantidades de materiais para os traços de argamassas com as respectivas adições.

TABELA 24 - ARGAMASSA COM ADIÇÃO SA A 10%

ARGAMASSA COM SA A 10%					
Traço	a/c	Cimento (g)	Areia (g)	Silica (g)	Água (g)
1:3	0,45	6500	19500	650	3218
1:3	0,50	6000	18000	600	3300
1:3	0,55	6000	18000	600	3630

TABELA 25 - ARGAMASSA COM ADIÇÃO NS A 2%

QUANTIDADES					
Traço	a/c	Cimento (g)	Areia (g)	NS (g)	Água (g)
1:3	0,45	6500	19500	130	2925
1:3	0,50	6000	18000	120	3000
1:3	0,55	6000	18000	120	3300

TABELA 26 - ARGAMASSA COM ADIÇÃO EB A 20%

QUANTIDADES					
Traço	a/c	Cimento (g)	Areia (g)	EB (g)	Água (g)
1:3	0,45	6500	19500	1300	1885
1:3	0,50	6000	18000	1200	2040
1:3	0,55	6000	18000	1200	2340

4.4 CORPOS-DE-PROVA

Foram utilizados moldes com dimensões 50 x 100 mm, conforme especifica a NBR 7215/98, para moldar CPs que foram submetidos a ensaios de resistência à compressão axial, absorção por capilaridade (APC) e absorção por imersão (AI).

Para os ensaios de resistência à tração na flexão, foram utilizadas fôrmas com dimensões de 40 x 40 x 160 mm. Já para o ensaio de absorvidade foram usados moldes prismáticos de 100 x 100 x 200 mm. Os moldes são mostrados na Figura 38.



FIGURA 38 - MOLDES CILÍNDRICOS E PRISMÁTICOS

Para a realização dos diversos ensaios, considerando 3 repetições, o total de CPs obtido foi de 2967, conforme mostra a Tabela 27.

TABELA 27 - QUANTIDADE DE CORPOS-DE-PROVA

QUANTIDADE DE CPs	QUANTIDADE POR TRAÇO	TOTAL
Resistência à compressão axial	16	2064
Absorvidade	1	129
Resistência à tração na flexão	2	258
Absorção por Imersão	2	258
Absorção por Capilaridade	2	258
TOTAL		2967

4.5 DOSAGENS

Para a obtenção de resultados com validação estatística, foram realizadas três repetições onde se aleatorizaram os traços, conforme mostra a Tabela 28, denominadas R3, R4 e R5, respectivamente. A importância da aleatorização se deve às diferenças nos resultados influenciados por fatores tais quais umidade relativa do ambiente e temperatura.

TABELA 28 - REPETIÇÕES DOS TRAÇOS

REPETIÇÃO 3 – R3					REPETIÇÃO 4 – R4					REPETIÇÃO 5 – R5				
1	19	21	15	41 13	1	61	21	17	41 67	1	21	21	61	41 13
2	12	22	65	42 61	2	28	22	8	42 1	2	32	22	62	42 15
3	21	23	29	43 67	3	14	23	33	43 62	3	19	23	34	43 11
4	33	24	4	- -	4	3	24	25	- -	4	23	24	27	- -
5	32	25	36	- -	5	23	25	10	- -	5	3	25	9	- -
6	11	26	17	- -	6	34	26	20	- -	6	6	26	28	- -
7	29	27	63	- -	7	15	27	5	- -	7	26	27	18	- -
8	16	28	9	- -	8	65	28	26	- -	8	33	28	64	- -
9	10	29	23	- -	9	18	29	66	- -	9	35	29	63	- -
10	31	30	8	- -	10	36	30	19	- -	10	17	30	24	- -
11	20	31	6	- -	11	4	31	7	- -	11	67	31	14	- -
12	30	32	22	- -	12	35	32	21	- -	12	29	32	1	- -
13	26	33	14	- -	13	27	33	6	- -	13	36	33	22	- -
14	24	34	62	- -	14	30	34	11	- -	14	7	34	30	- -
15	27	35	25	- -	15	22	35	16	- -	15	20	35	4	- -
16	64	36	18	- -	16	32	36	2	- -	16	10	36	8	- -
17	35	37	1	- -	17	31	37	9	- -	17	12	37	66	- -
18	5	38	2	- -	18	29	38	13	- -	18	2	38	31	- -
19	34	39	7	- -	19	24	39	12	- -	19	5	39	16	- -
20	3	40	66	- -	20	63	40	64	- -	20	25	40	65	- -

Para a realização dos traços, seguindo a seqüência da aleatorização, os materiais foram separados, pesados e a temperatura dos mesmos obtida. Os valores limites para condições de climatização foram 24 ± 4 °C para materiais; 23 ± 2 °C para ar; e 50 e 65% para umidade relativa do ar.

A produção de argamassa foi realizada em betoneira de capacidade de 50 litros, controlada pela determinação do índice de consistência normal, prescrita no Apêndice B da NBR 7215/98. A seqüência da Figura 39 à Figura 44 mostra o procedimento para obtenção da consistência da argamassa, considerando a

lubrificação da mesa e fôrma, preenchimento da fôrma em três camadas da mesma altura, aplicando-se, respectivamente 15, 10 e 5 golpes uniformes e distribuídos com soquete.



FIGURA 39 - MESA PARA ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA



FIGURA 40 - TRONCO DE CONE



FIGURA 41 - GOLPES COM O SOQUETE



FIGURA 42 - RETIRADA DO CONE



FIGURA 43 - INÍCIO DO ABATIMENTO



FIGURA 44 - FIM DO ABATIMENTO

O valor de consistência, em milímetros, foi obtido por meio de paquímetro, sendo o valor estipulado em Norma de 250 ± 10 mm. Quando extrapolado este valor, a argamassa foi descartada, e em nova dosagem, adicionou-se aditivo superplastificante até se obter a consistência desejada.

4.6 ENSAIOS

Os ensaios foram realizados considerando-se as propriedades mecânicas das argamassas (resistência à compressão axial e à tração na flexão), durabilidade (absorção por sucção capilar, absorção por imersão, absorção por capilaridade) e componentes químicos (MEV).

4.6.1 Resistência à Compressão Axial

Conforme recomendações da NBR 7215/98 - Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão e NBR 13279/95 - Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão, foi usado molde de 50 x 100 mm. O adensamento manual foi executado com soquete em 4 camadas uniformes com 30 golpes cada. Depois das 24 horas iniciais, os CPs foram desmoldados, identificados e encaminhados à câmara úmida para serem submetidos à cura até a idade de ruptura previamente estipulada.

Os ensaios de resistência à compressão axial foram executados para quatro idades (1, 3, 7 e 28 dias). Os CPs correspondentes à primeira idade foram capeados com enxofre e levados à prensa hidráulica para ruptura, logo após a desmoldagem. Os outros CPs aguardaram na câmara úmida até o dia especificado para sua ruptura.

O ensaio consistiu na aplicação controlada de carga vertical no topo do CP, conforme mostrado na Figura 45.



FIGURA 45 - CAPEAMENTO E RUPTURA DE CP

4.6.2 Ensaio de Resistência à Tração na Flexão

A NBR 12142/92 prescreve que os CPs devem possuir dimensões de 15 x 15 x 50 cm. Devido à utilização de argamassas para os ensaios, aliado ao fato da economia de material, optou-se pela redução das dimensões dos CPs. As dimensões utilizadas foram 40 x 40 x 160 mm. A redução nas dimensões dos CPs é

uma prática consagrada no que tange à comparação de desempenho de materiais. Isto pode ser verificado no trabalho realizado por KORMANN (2002), cujos ensaios de resistência à tração na flexão e de envelhecimento acelerado, tiveram seus CPs com dimensões reduzidas.

Sendo assim, os CPs moldados foram adensados manualmente, em duas camadas com 25 golpes uniformemente aplicados e posteriormente curados como estabelecido na NBR 5738/1994 - Moldagem e cura de CPs cilíndricos ou prismáticos de concreto.

Foi necessário fazer uma adaptação no procedimento do ensaio no que se refere à aplicação da carga. Pela NBR 12142/92, a aplicação deve ser feita em dois pontos eqüidistantes das faces laterais do CP. Porém, o equipamento do laboratório não possuía dispositivo adequado para tal; sendo assim foi decidido aplicar uma única carga no centro de cada CP, como mostra a Figura 46.



FIGURA 46 - ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO

4.6.3 Absorção por Sucção Capilar – Absortividade

Ensaio proposto por KHELAM (1988) para determinar a massa de água requerida para saturar a argamassa, também denominado porosidade efetiva, e a velocidade unidimensional de absorção por sucção capilar ou taxa de absorção capilar.

O procedimento deste ensaio implica em monitorar, ao longo do tempo, o acréscimo do peso do CP à medida que aumenta a absorção de água, até a estabilização do peso.

A taxa de absorção capilar é determinada pela relação entre a espessura do CP e a raiz quadrada do tempo de saturação. A porosidade efetiva corresponde à razão entre o acréscimo de peso e o volume da amostra.

A moldagem desses CPs cúbicos, dimensões 100 x 100 x 200 mm, foi realizada em duas camadas, com vibrador de imersão.

As amostras utilizadas para os ensaios foram provenientes do CPs de dimensão de 100 x 100 x 200 mm, de onde foram serradas fatias prismáticas de 100 x 100 x 25 mm, numeradas e previamente curadas durante 7 dias em câmara úmida.

Após o fatiamento em serra circular, as amostras foram colocadas em estufa com temperatura igual a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$ até atingir a constância de massa indicada com 0,1% de variação da perda de massa, durante 7 a 9 dias. A importância da secagem dos CPs serrados, além de interromper a hidratação, permite a perfeita aderência da resina epóxi na superfície da argamassa. O resfriamento se prolongou até os CPs atingirem a temperatura ambiente de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$, em uma caixa lacrada contendo sílica gel, evitando absorção de umidade.

Após o resfriamento, os CPs foram selados lateralmente com resina epóxi, conforme mostra a Figura 47.

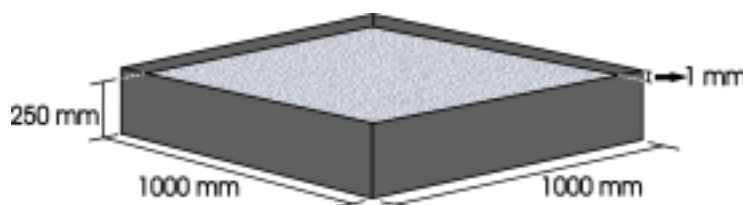


FIGURA 47 - APLICAÇÃO DE RESINA EPÓXI NAS LATERAIS DO CP

Cuidados com a aplicação de resina epóxi foram tomados colocando-se papel e fita crepe na base e topo do CP a ser ensaiado. Passadas 24 horas, foram colados os CPs com poliuretano, e foi executado um sistema composto de placa de PVC com cânula e silicone, como mostra a Figura 48.

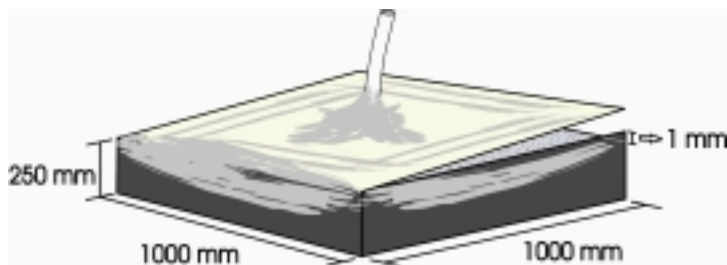


FIGURA 48 - ACOPLA DE SISTEMA CÂNULA E PVC COM POLIURETANO

Deste modo, quando submersa em água, a superfície superior da amostra permanece sujeita a pressão atmosférica e sem presença da água, permitindo assim a passagem de ar para a atmosfera enquanto a água sobe pelos capilares, como mostrado na Figura 49.

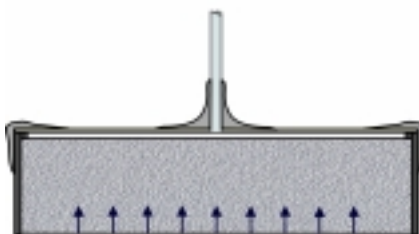


FIGURA 49 - PASSAGEM DE ÁGUA PELOS CAPILARES DA ARGAMASSA

Para a realização do ensaio, utilizou-se balança hidrostática com capacidade para 2 kg e precisão de 1 g. A amostra deve ficar suspensa em malha metálica bi-apoiada à balança dentro de uma banheira com água até 5 cm do topo do CP. A sala onde se realiza o ensaio é climatizada, evitando-se problemas com viscosidade da água e taxa de absorção. O esquema de ensaio pode ser verificado na sequência da Figura 50 à Figura 53.

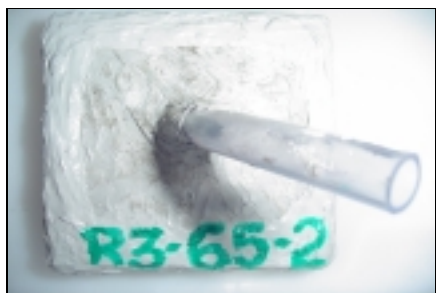


FIGURA 50 - AMOSTRA VEDADA NAS LATERAIS E TOPO



FIGURA 51 - ESPESSURA DA LÂMINA DE ÁGUA SOBRE O TOPO DO CP



FIGURA 52 - AMOSTRAS AGUARDANDO PESAGEM NA BALANÇA

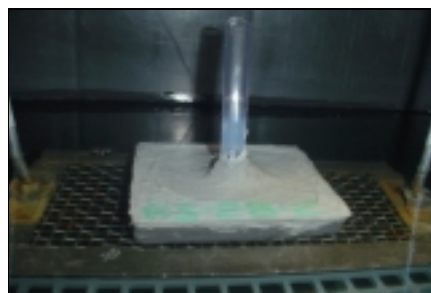


FIGURA 53 - AMOSTRA SENDO PESADA

4.6.4 Absorção por Imersão

O preenchimento dos moldes foi realizado em 4 camadas homogeneamente distribuídas, com 30 golpes cada, e rasado com régua no topo do molde, retirando as sobras conforme determinado pela NBR 7215/98.

O ensaio consiste no acréscimo de massa num determinado período de tempo através de imersão e fervura da argamassa endurecida.

O ensaio de absorção por imersão foi efetuado seguindo a NBR 9778/87 Argamassa e Concreto Endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Foram ensaiados dois CPs de cada argamassa de reparo aos 7 dias de idade. Apesar do procedimento prescrito na NBR 9778/87 solicitar três CPs para análise, não havia fôrmas disponíveis para tal ensaio. Foram ensaiados aos 7 dias, pois para reparos em câmaras e caixas subterrâneas há a necessidade de liberar as estruturas o mais breve possível.

Inicialmente as amostras foram submetidas à secagem em estufa de 105 ± 5 °C, com resfriamento em caixas vedadas contendo sílica gel. Completada a secagem, a saturação dos CPs foi realizada nas primeiras 4 horas com 1/3 altura do CP ficando submersa. Após as 4 horas iniciais, os CPs foram enxugados e pesados em balança digital com precisão de 0,01 g. Após a leitura, o CP foi novamente

submerso em $2/3$ de sua altura, por mais 4 horas. Transcorridas 8 horas, realizou-se a leitura dos CPs novamente e então, foram totalmente submersos. Decorridas 24, 48 e 72 horas foram efetuadas as leituras, determinadas conforme apresentado nas Figura 54 a Figura 56.

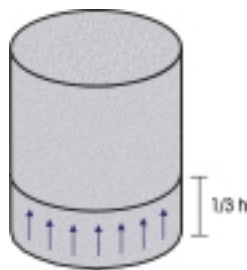


FIGURA 54 - 1/3 DE ÁGUA

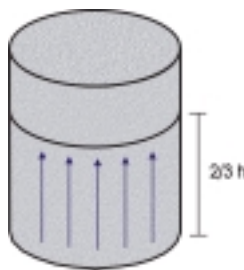


FIGURA 55 - 2/3 DE ÁGUA

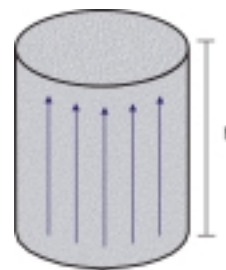


FIGURA 56 - IMERSO EM ÁGUA

Completada a fase de saturação em água à temperatura de 23 ± 2 °C, as amostras foram colocadas em recipiente contendo água para um processo de ebulição progressiva, durante 5 horas. A seguir, a água foi resfriada naturalmente durante 14 horas para posteriores determinações das amostras previamente enxugadas. O esquema do ensaio é mostrado na sequência, nas Figura 57 a Figura 59.



FIGURA 57 - PESAGEM



FIGURA 58 - IMERSÃO



FIGURA 59 - FERVURA

4.6.5 Absorção por Capilaridade

Os CPs utilizados para este ensaio foram preenchidos, adensados e curados como no ensaio de absorção por imersão.

O ensaio de imersão por capilaridade foi realizado conforme a NBR 9779/95 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.

O procedimento de preparação da amostra coincide com a preparação especificada no ensaio de absorção por imersão.

A execução deste ensaio é realizada imergindo-se parcialmente os CPs de argamassas em água, com temperatura de 23 ± 2 °C, como mostra a Figura 60.



FIGURA 60 - CPS EM ENSAIO DE IMERSÃO

A base do CP deve ficar sobre uma grelha permitindo a passagem de água. A espessura da lâmina d'água é especificada em 5 ± 1 mm, disposta sob à base do CP. Cuidados devem ser tomados evitando molhar as laterais e topo do CP conforme mostra a Figura 61.



FIGURA 61 - LÂMINA DE ÁGUA DE 5 MM SOB A BASE DO CP

Após 3 horas de imersão parcial do CP, efetuam-se as leituras, repetindo-se o procedimento após 6, 24, 48 e 72 horas. Realizadas as leituras, o CP é rompido longitudinalmente pelo método do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, conforme NBR 7222/95 - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de CPs cilíndricos. Isto é feito pela necessidade da visualização da absorção da água no interior do CP de argamassa, conforme mostrado na Figura 62 e na Figura 63.

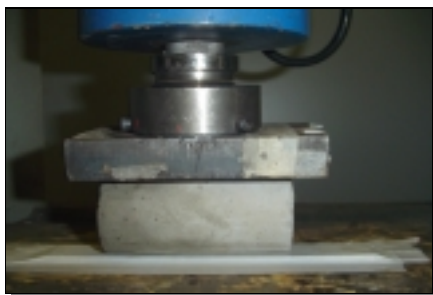


FIGURA 62 - TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL



FIGURA 63 - LEITURA DE CAMINHO DE CAPILARES

As leituras das alturas molhadas nos CPs foram realizadas em pelo menos 4 pontos. A Figura 64 e a Figura 65 mostram, respectivamente, o CP e a ação da água no mesmo.

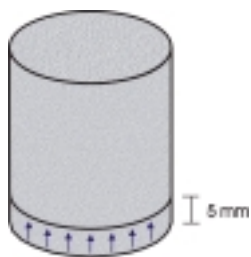


FIGURA 64 - ABSORÇÃO CAPILAR

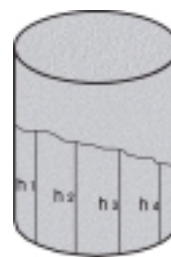


FIGURA 65 - ALTURAS DA ASCENSÃO CAPILAR

4.6.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

Após a ruptura dos CPs utilizados no ensaio de tração na flexão, estes foram reduzidos com martelo e alicates, visando obter amostras para MEV. Estas foram submersas em acetona pura a fim de cessarem as reações dos componentes da argamassa e retirar a umidade excedente para posterior metalização com ouro.

A MEV, juntamente com o auxílio de espectrômetro por energia dispersiva (EDS), proporciona uma idéia dos compostos químicos presentes nas amostras de argamassa. Assim sendo, pode-se determinar a correlação entre a morfologia e os compostos químicos.

Em função da quantidade de amostras, optou-se por fazer MEV de apenas algumas amostras escolhidas aleatoriamente.

5 RESULTADOS

5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

5.1.1 Argamassas com Adições

Conforme a NBR 7215/98, foram moldados quatro CPs para cada traço, ensaiados a 1, 3, 7 e 28 dias de idade, sendo três repetições com coeficiente de variação entre 5 e 10%. Sendo assim, foi calculada a média dos valores para cada adição, com quatro tipos de cimento e três relações a/c para as argamassas de sistemas de reparos.

Os resultados mostrados na Figura 66 à Figura 68, indicam a maior eficiência de argamassas com adição de sílica ativa quando utilizadas com cimento tipo CP IV - 32 e menor relação a/c. Verifica-se também, que quanto maior a relação a/c, mais eficaz é a utilização de sílica ativa no aumento da resistência à compressão.

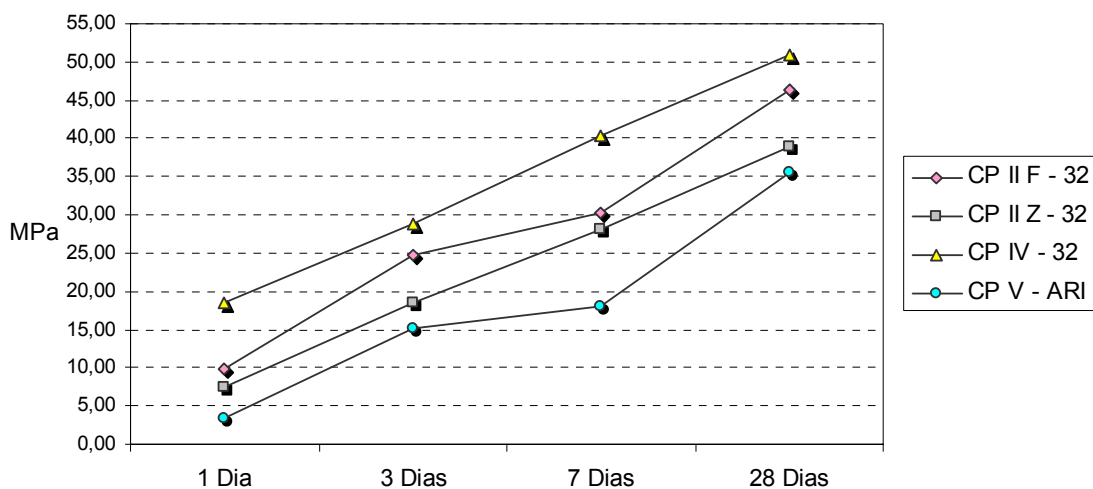


FIGURA 66 - RC – ARGAMASSAS COM SA – a/c 0,45

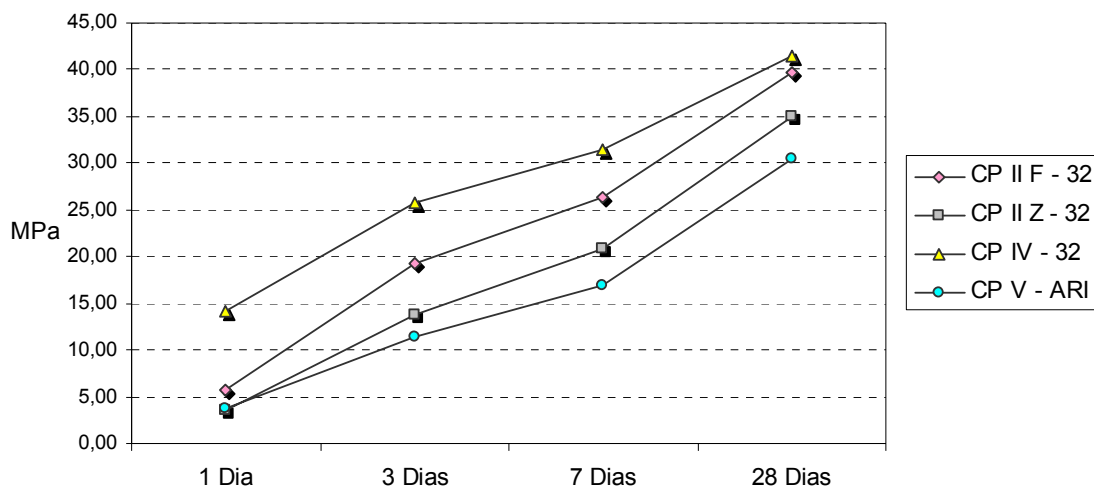


FIGURA 67 - RC – ARGAMASSAS COM SA – a/c 0,50

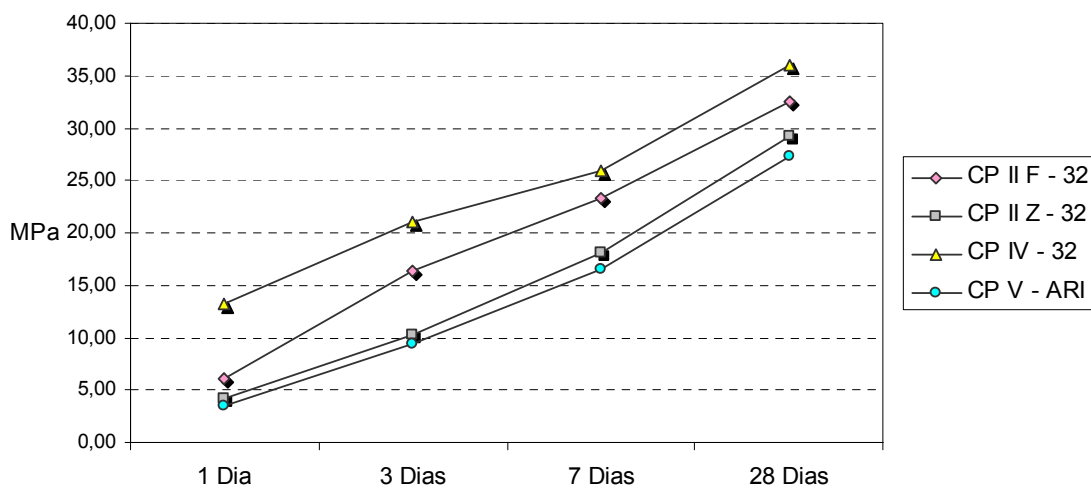


FIGURA 68 - RC – ARGAMASSAS COM SA – a/c 0,55

Para argamassas dosadas com adição de nitrito de sódio, como visto na Figura 69 à Figura 71, verifica-se melhor desempenho do aditivo quando usado com menor relação a/c e cimento tipo CP II F - 32, para quase todas as idades.

A importância do valor obtido para a resistência nos primeiros dias ocorre devido à realização de reparos no menor prazo possível, ou seja, é função do grau de hidratação. Sendo assim, pode-se afirmar que, para a adição de nitrito de sódio, a argamassa com menor relação a/c e cimento tipo CP IV - 32 mostrou-se a mais indicada para tais aplicações. Para argamassas com relação a/c mais elevada, o ganho da resistência ocorre de forma mais lenta.

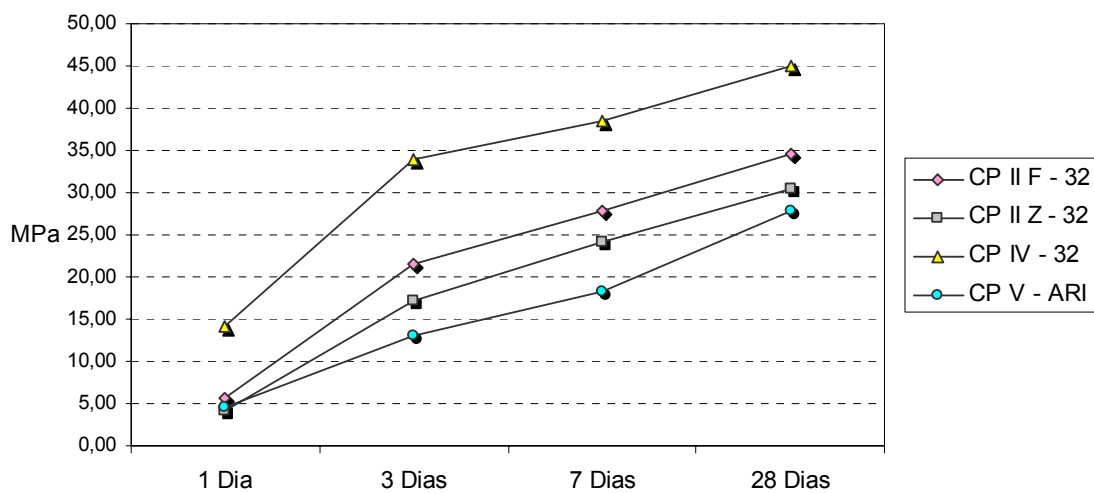


FIGURA 69 - RC – ARGAMASSAS COM NS – a/c 0,45

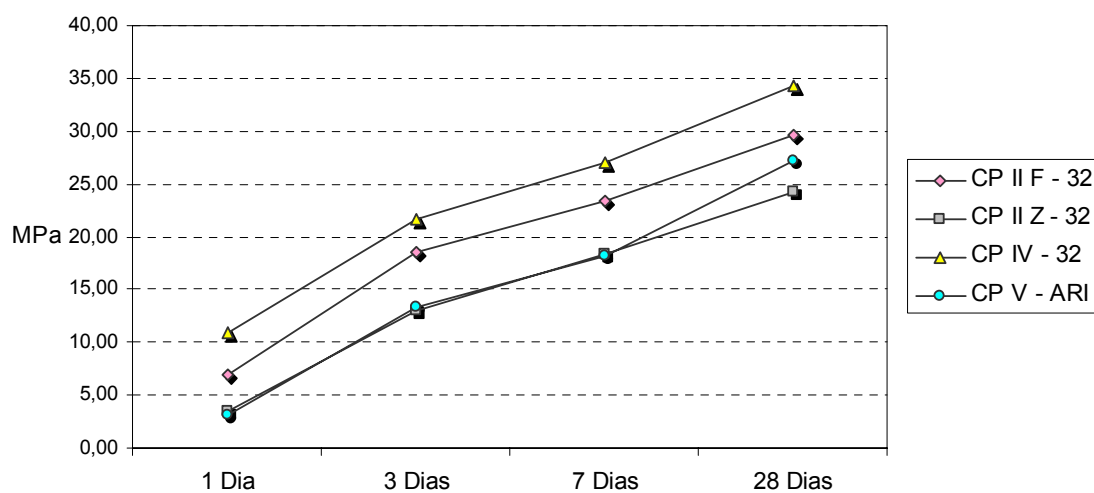


FIGURA 70 - RC – ARGAMASSAS COM NS – a/c 0,50

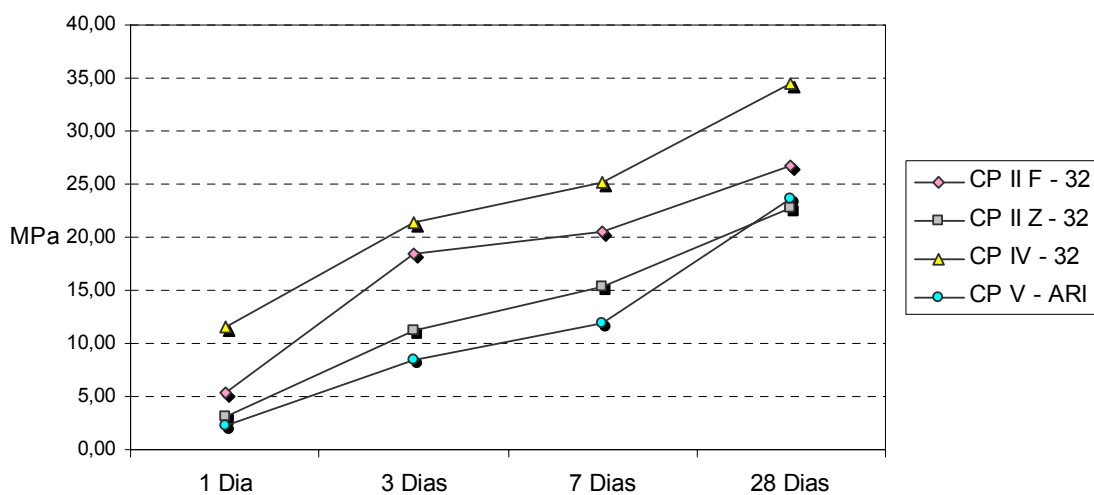


FIGURA 71 - RC – ARGAMASSAS COM NS – a/c 0,55

Para argamassas com adição de estireno-butadieno, o cimento tipo CP IV - 32 com menor relação a/c , mostrou-se significativamente superior às demais argamassas, em todas as idades, conforme mostrado da Figura 72 à Figura 74. Contudo, a utilização desta adição indica menor resistência à compressão axial com relação à adição de sílica ativa e nitrito de sódio.

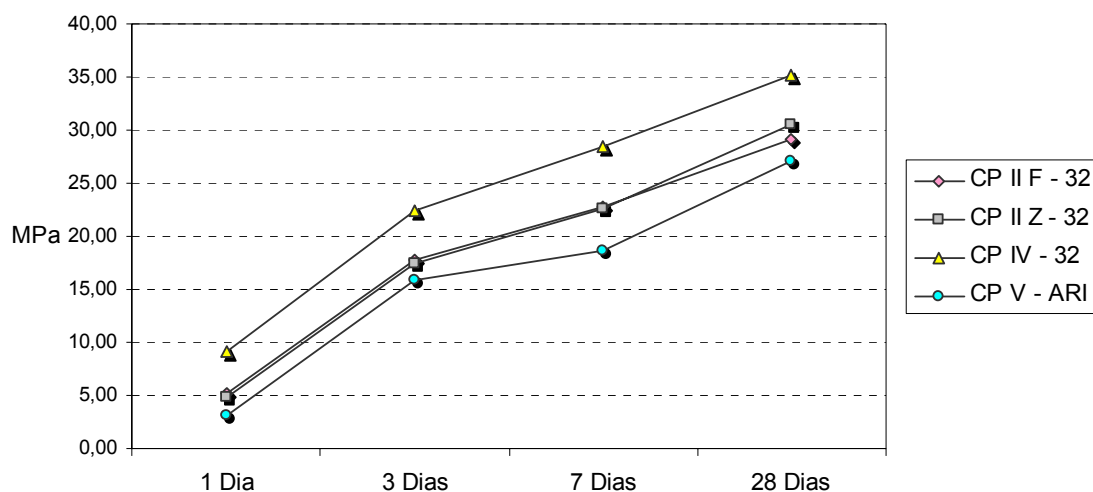


FIGURA 72 - RC – ARGAMASSAS COM EB – a/c 0,45

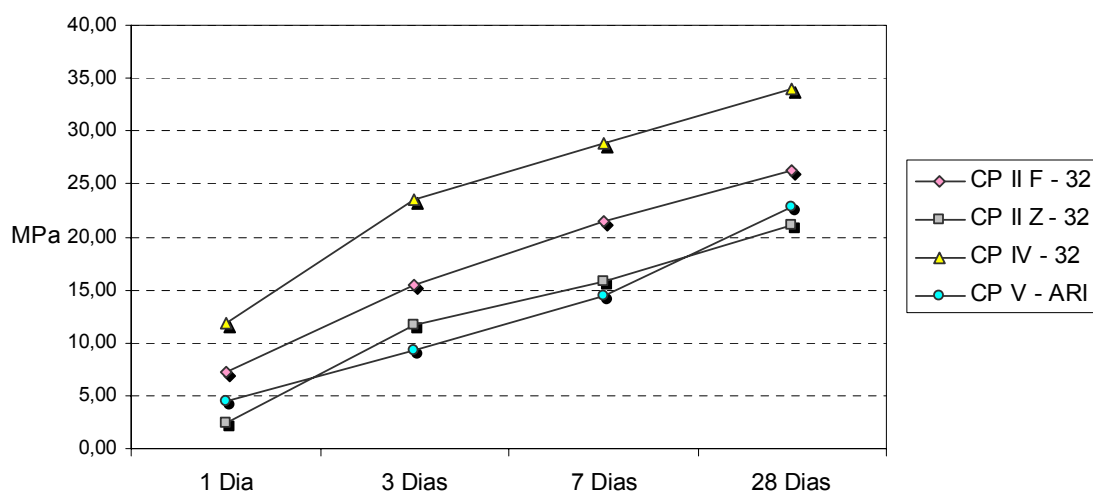


FIGURA 73 - RC – ARGAMASSAS COM EB – a/c 0,50

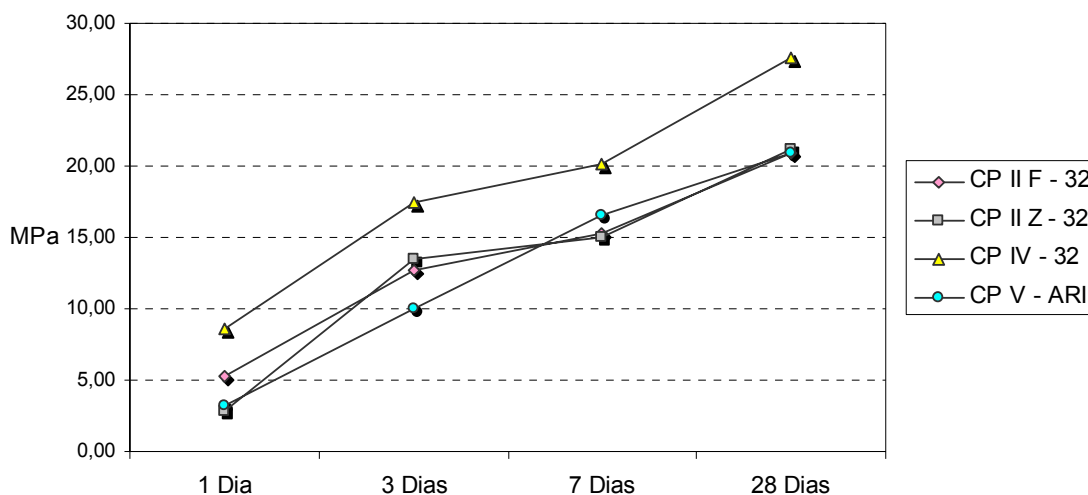


FIGURA 74 - RC – ARGAMASSAS COM EB – a/c 0,55

Resumindo, as argamassas realizadas com adição de sílica ativa obtiveram, em média, melhor desempenho em todas as idades ensaiadas e em relação às outras adições. Em função disto, observa-se que ao longo do tempo, o acréscimo das diferenças entre os resultados das resistências médias para todas as idades é semelhante ao estudo realizado por KULAKOWSKI (1994), citado por CABRAL (2000). Argamassas com sílica ativa apresentam maiores resistências, pois há maior hidratação do cimento e atividade pozzolânica (KULAKOWSKI, 1994).

O acréscimo de resistência proporcionado pela adição do inibidor de corrosão à base de nitrito de sódio pode ser atribuído à aceleração da pega e do endurecimento, além das modificações microestruturais.

A argamassa com adição de estireno-butadieno não apresentou resistência elevada, ao contrário do descrito por CABRAL (2000). Em seu trabalho, o autor comprova que a adição deste polímero acarreta o decréscimo da porosidade, e conseqüentemente, ganho de resistência.

5.1.2 Argamassas Comerciais

Apresenta-se na Figura 75, o desempenho final de resistência à compressão axial das argamassas comerciais.

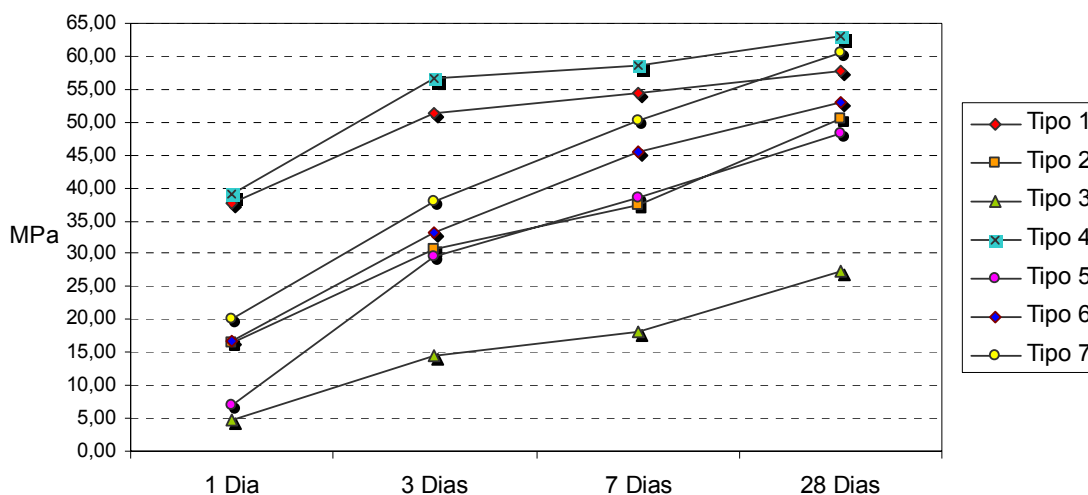


FIGURA 75 - RC – ARGAMASSAS COMERCIAIS

Nota-se que a argamassa Tipo 4 possui resultados mais satisfatórios em relação às demais argamassas comerciais, seguida pelas argamassas Tipo 1 e Tipo 7.

Observa-se também na Figura 75, as variações na evolução de cada tipo de argamassa comercial:

- para a idade de 1 dia, a argamassa Tipo 4 e Tipo 3 diferem significativamente entre elas;
- para a idade de 7 dias, a argamassa Tipo 2 teve menor resistência em relação à argamassa Tipo 5;
- para a idade de 28 dias, a argamassa Tipo 1 teve menor resistência em relação à argamassa Tipo 7, porém as outras argamassas mantiveram a evolução de suas resistências.

5.1.3 Comparação entre Resultados Finais de Resistência à Compressão Axial

Dentre as argamassas com adições e comerciais, constatou-se que algumas das argamassas comerciais obtiveram resistências significativamente superiores para todas as idades analisadas. Os resultados destes ensaios encontram-se no Apêndice E.

5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

5.2.1 Argamassas com Adições

Da Figura 76 à Figura 78, estão mostrados os valores obtidos nos ensaios de resistência à tração na flexão para a idade de 7 dias, conforme NBR 12142/92. As argamassas com adição de sílica ativa obtiveram melhor desempenho perante as outras adições. Constatase que a diminuição da relação a/c influencia diretamente a resistência à tração na flexão, principalmente devido à diminuição da porosidade, obtida pelo refinamento dos poros e preenchimento de vazios.

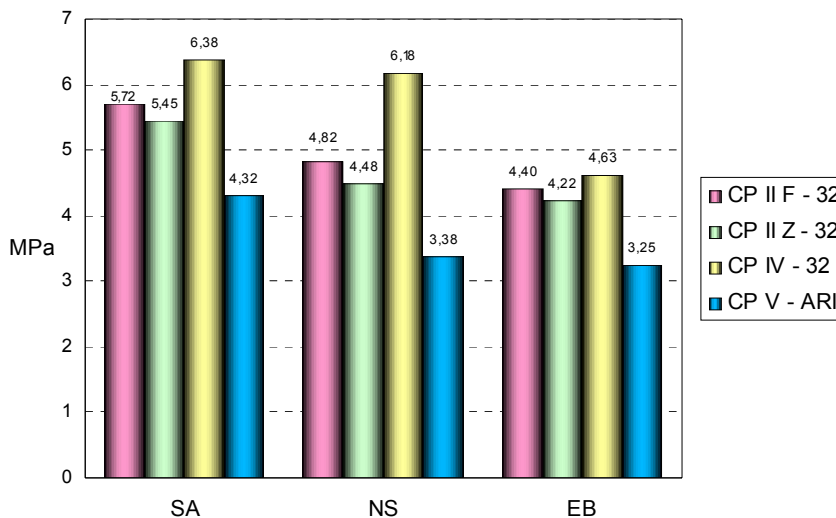


FIGURA 76 - RTF – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – a/c 0,45

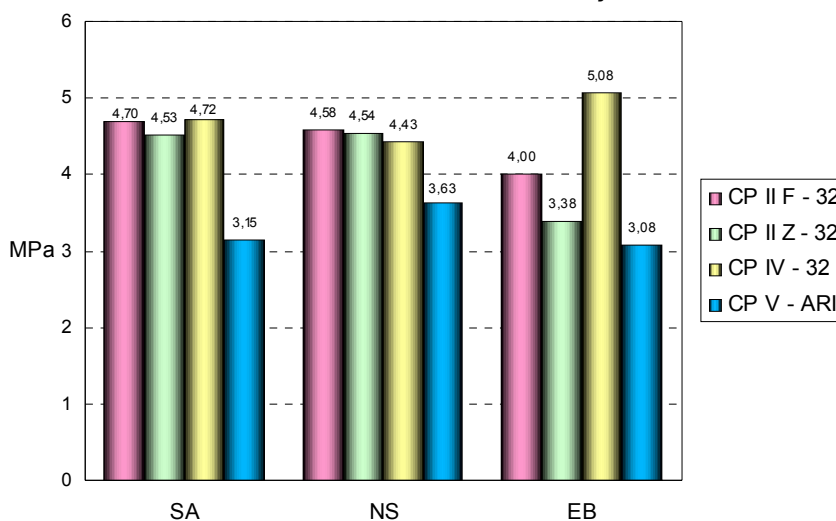


FIGURA 77 - RTF – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – a/c 0,50

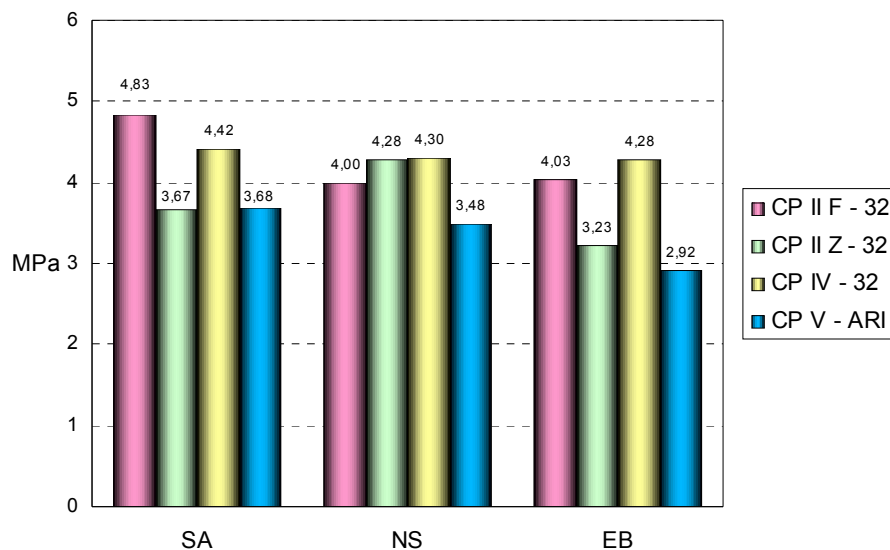


FIGURA 78 - RTF – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – a/c 0,55

5.2.2 Argamassas Comerciais

A argamassa Tipo 4 obteve melhor resultado nos ensaios de resistência à tração na flexão, em comparação com as outras argamassas. Observa-se que a argamassa Tipo 6 atingiu elevado valor de resistência à tração na flexão, confirmando o estudo realizado por CABRAL (2000), que indica argamassas com adição de polímeros com maior resistência à tração na flexão frente a outras adições.

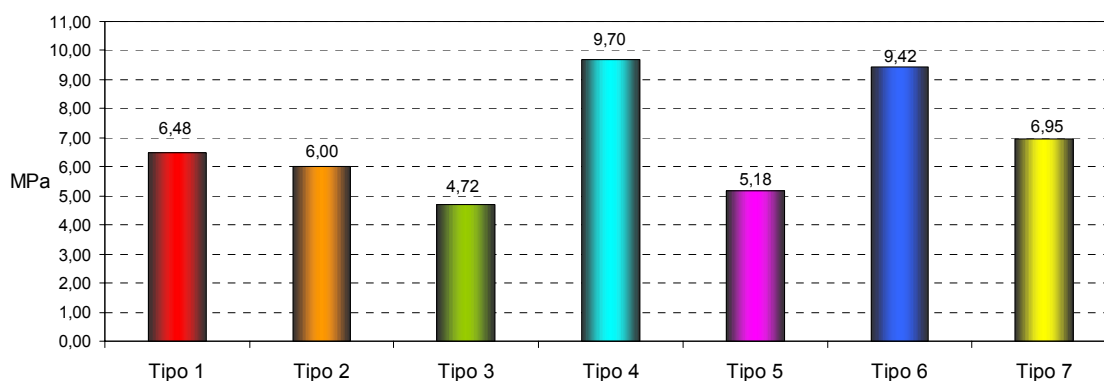


FIGURA 79 - RTF – ARGAMASSAS COMERCIAIS

5.2.3 Comparação entre Resultados Finais de Resistência à Tração na Flexão

Algumas argamassas comerciais demonstraram comportamento significativamente superior às misturas com adições para o ensaio de resistência à tração na flexão. No Apêndice F encontram-se os resultados obtidos.

5.3 ABSORÇÃO POR SUCÇÃO CAPILAR - ABSORTIVIDADE

Para o ensaio proposto por KELHAM (1998), obtiveram-se dois resultados na forma de taxa de absorção e resistência capilar, para a idade de 7 dias.

5.3.1 Argamassas com Adições

Conforme análise da Figura 80 à Figura 82, para os resultados de resistência capilar verifica-se desempenho superior da sílica ativa com relação a/c 0,45 e cimento tipo CP IV - 32, com valores superiores às outras adições. O estireno-butadieno tem o segundo melhor desempenho, considerado para os cimentos tipo CP IV - 32 e CP V - ARI, e relação a/c 0,45 e 0,50, respectivamente. Para a relação a/c 0,55, tem-se a argamassa com adição de nitrito de sódio como a de melhor eficiência.

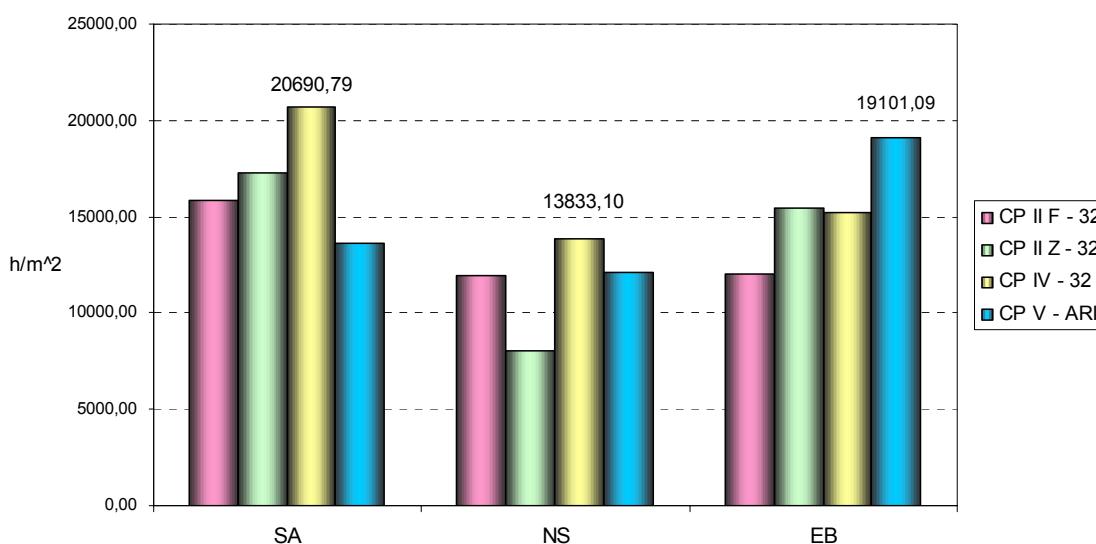
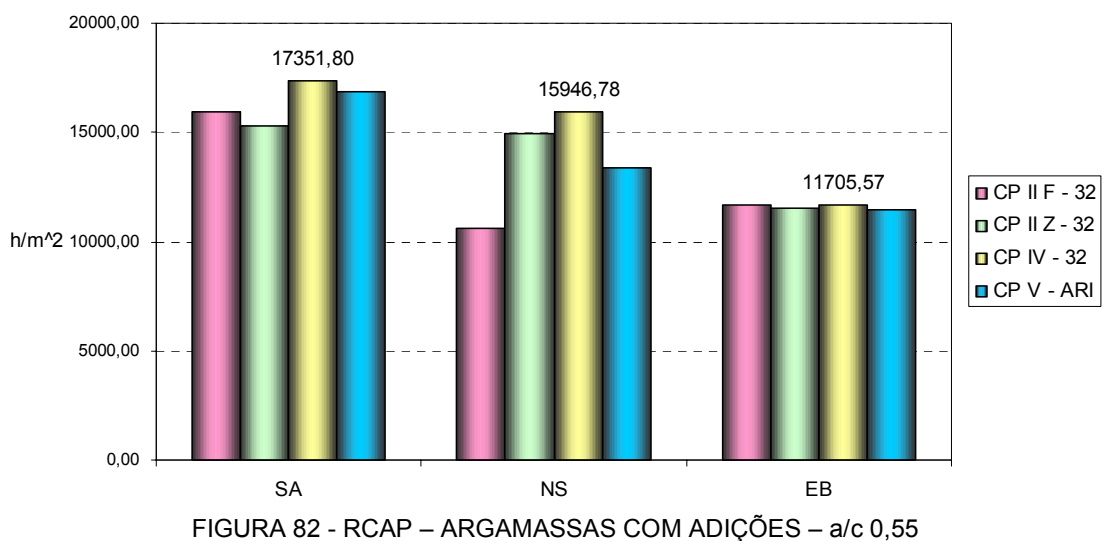
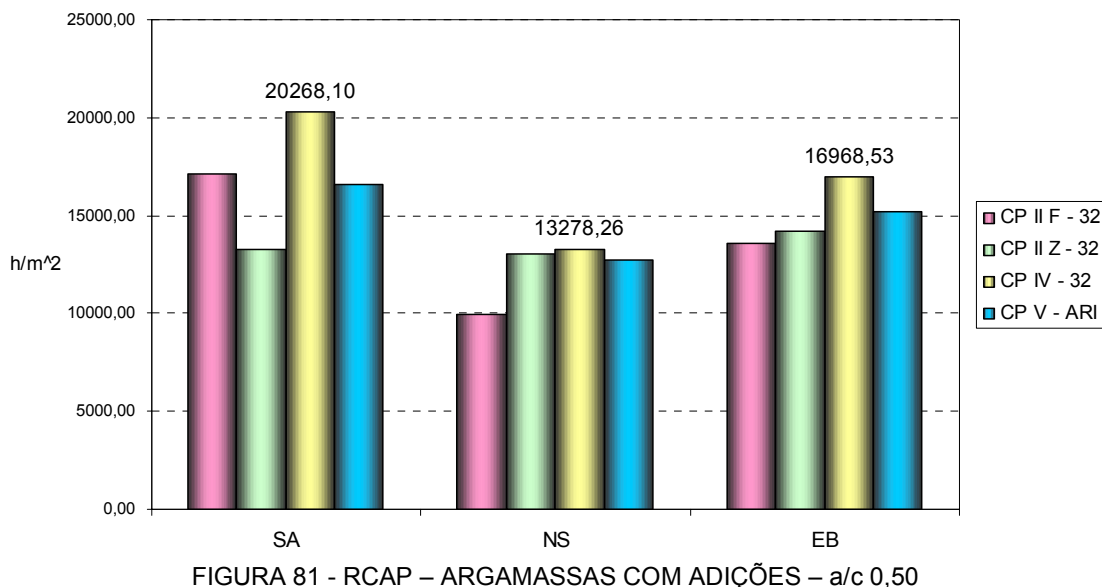


FIGURA 80 - RCAP – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – a/c 0,45



5.3.2 Argamassas Comerciais

De acordo com a Figura 83, a argamassa polimérica Tipo 7 apresentou comportamento superior às demais argamassas perante a presença de líquidos nos capilares. A Figura 84 mostra a argamassa Tipo 2 e Tipo 7 em estado úmido e seco, respectivamente, após ensaio de 100 horas.

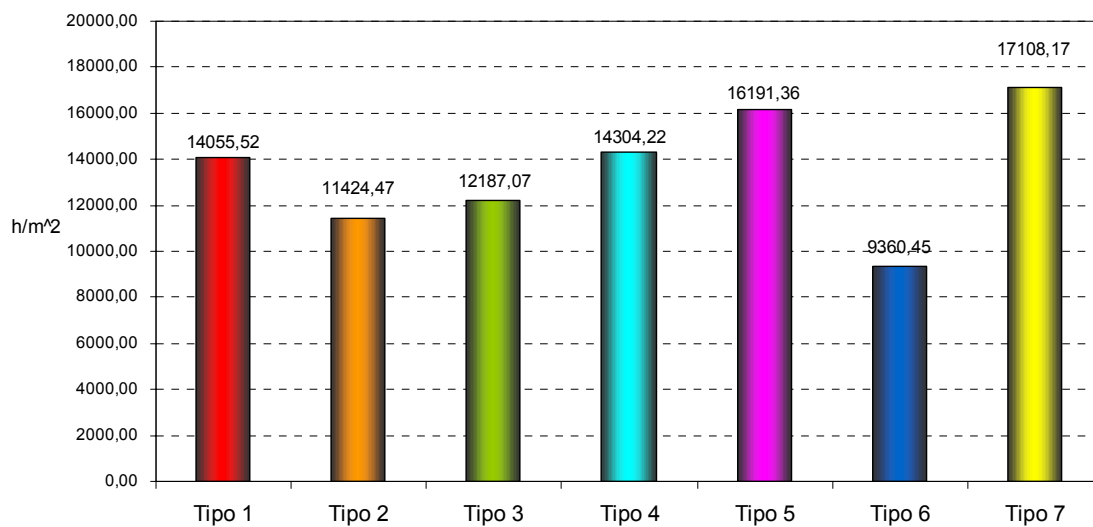


FIGURA 83 - RCAP – ARGAMASSAS COMERCIAIS



FIGURA 84 - ARGAMASSA ÚMIDA TIPO 2 E ARGAMASSA SECA TIPO 7

Da Figura 85 à Figura 87, pode ser observado que para diferentes relações a/c, tem-se menor valor da taxa de absorção para argamassas com adição de sílica ativa e com cimento tipo CP IV - 32.

Para as menores relações a/c, tem-se a argamassa com estireno-butadieno e cimentos CP IV - 32 e CP V - ARI, com desempenho superior ao da argamassa com adição de nitrito de sódio.

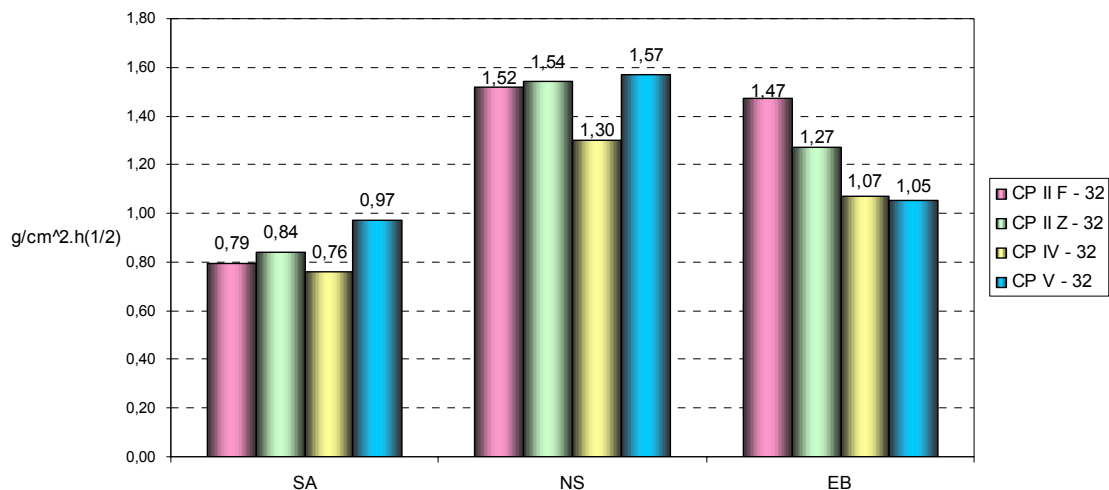


FIGURA 85 - TA – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – a/c 0,45

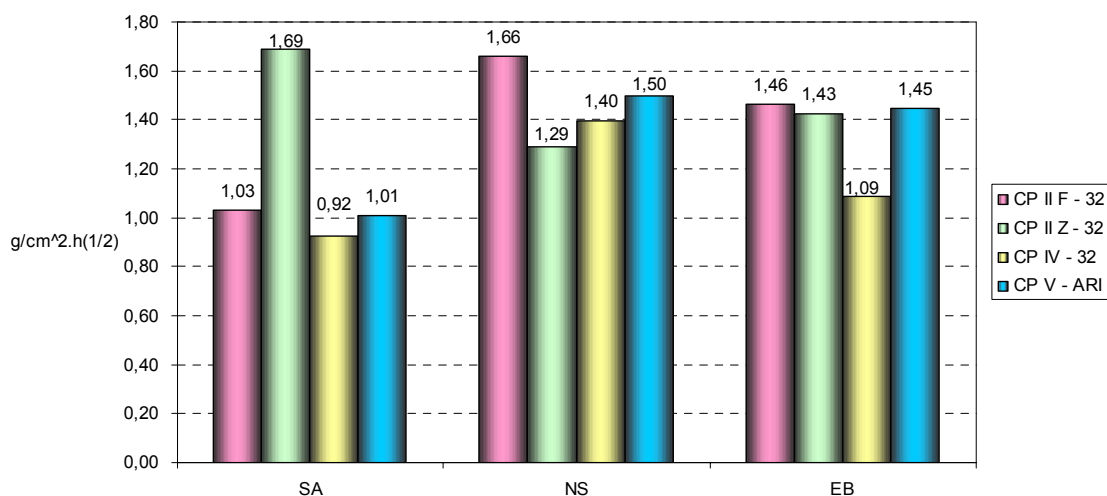


FIGURA 86 - TA – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – a/c 0,50

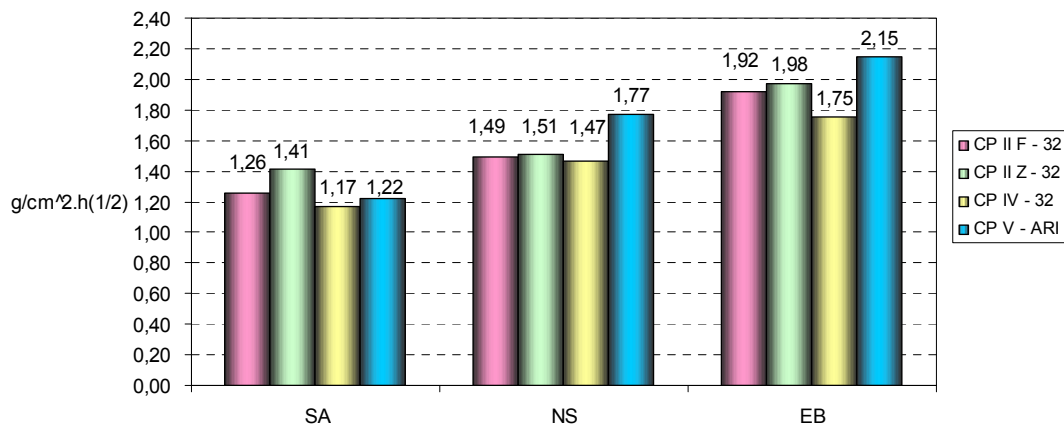


FIGURA 87 - TA – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – a/c 0,55

Como mostrado na Figura 88, a argamassa Tipo 6 apresentou sua taxa significativamente inferior às demais argamassas. Como já descrito no resultado de resistência a compressão axial, as adições de polímeros contribuem para a diminuição da quantidade de poros, ou seja, diminuem a taxa de absorção.

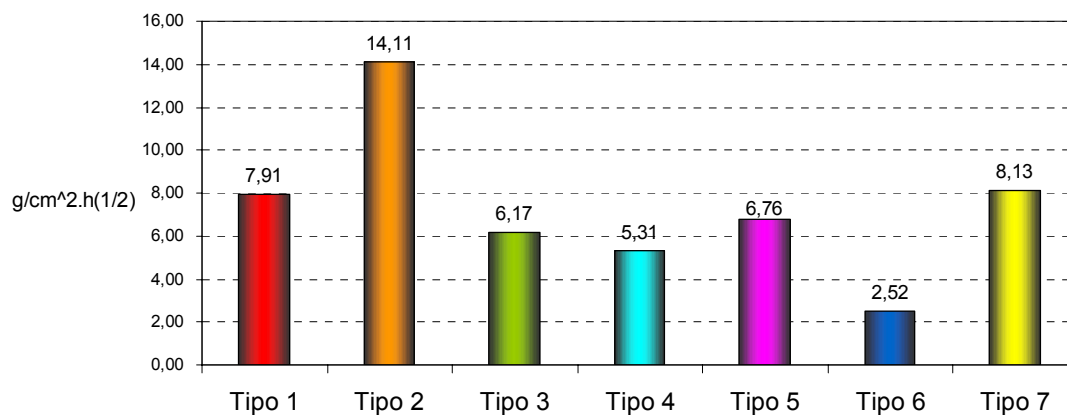


FIGURA 88 - TA – ARGAMASSAS COMERCIAIS

KULAKOWSKI (2002) salienta que a atuação da resistência capilar em argamassas é influenciada tanto pela alteração da relação a/c quanto pelas adições, ocorrendo uma forte interação entre estas variáveis.

5.3.3 Comparação entre Resultados Finais de Sucção Capilar

Argamassas realizadas com adição de sílica ativa apresentam maior eficiência em comparação com as argamassas comerciais, tanto para taxa de absorção quanto para resistência capilar. No Apêndice G e no Apêndice H, apresentam-se os resultados do ensaio de sucção capilar.

5.4 ABSORÇÃO POR IMERSÃO

5.4.1 Argamassas com Adições

Tem-se a seguir, da Figura 89 à Figura 91, os resultados obtidos para o ensaio de absorção por imersão, realizado conforme a NBR 9778/87.

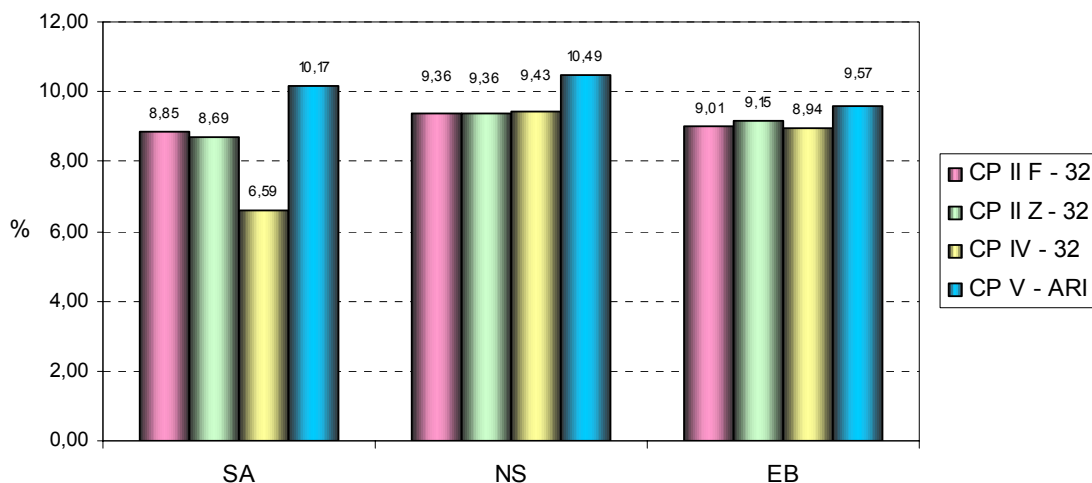


FIGURA 89 - COEFICIENTE DE AI – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – a/c 0,45

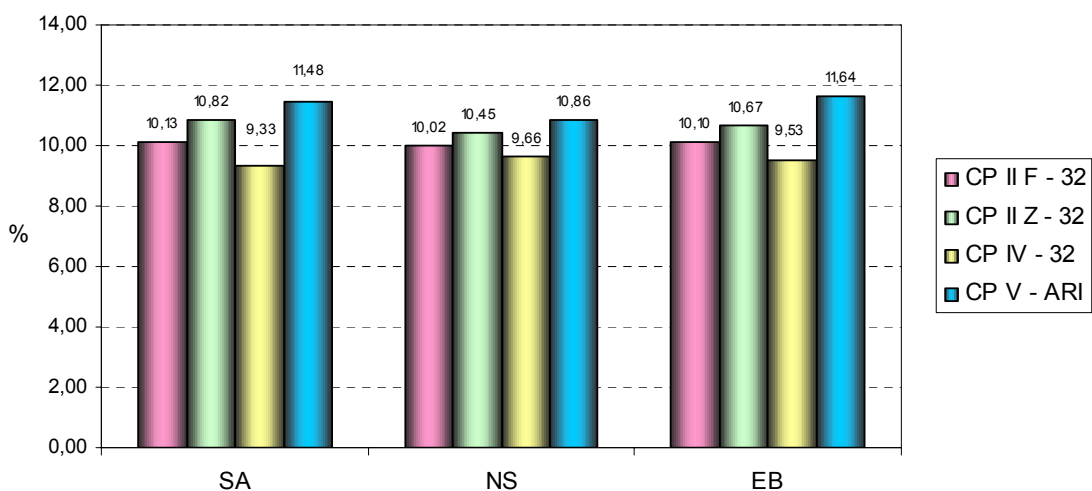


FIGURA 90 - COEFICIENTE DE AI – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES - a/c 0,50

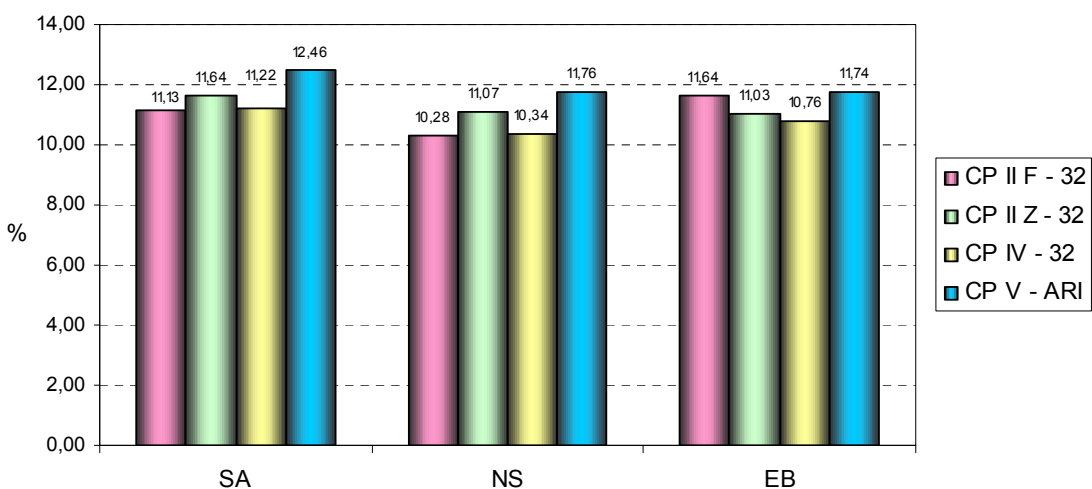


FIGURA 91 - COEFICIENTE DE AI – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES - a/c 0,55

Pode ser verificado que a argamassa com adição de sílica ativa, cimento tipo CP IV - 32 e relação a/c 0,45 corresponde ao menor coeficiente de absorção.

Divergindo do estudo realizado por CABRAL (2000), as argamassas com adição de polímero estireno-butadieno não apresentaram o melhor desempenho, porém, quando utilizado com o cimento CP IV - 32 e relação a/c 0,45, o valor do coeficiente de absorção por imersão apresentou redução.

Já para a adição de nitrito de sódio, o menor valor da taxa verificado correspondeu ao cimento tipo CP II F - 32 ou CP II Z - 32, com relação a/c 0,45. Constatou-se que a média dos percentuais para cada adição não diferem significativamente.

5.4.2 Argamassas Comerciais

A Figura 92 mostra os desempenhos das argamassas comerciais no ensaio de absorção por imersão.

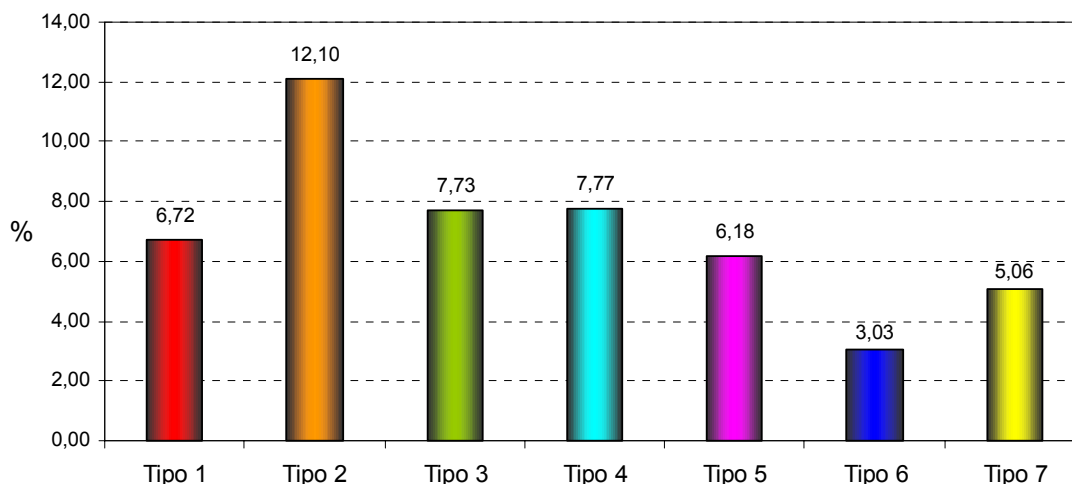


FIGURA 92 - COEFICIENTE DE AI – ARGAMASSAS COMERCIAIS

Verifica-se que a menor taxa de absorção é a da argamassa Tipo 6, seguida pela argamassa Tipo 7. Os resultados obtidos com a fervura dos CPs complementando o ensaio de imersão, indicaram o mesmo desempenho dos traços realizados com argamassas com adições e argamassas comerciais.

5.4.3 Comparação entre Resultados Finais de Absorção por Imersão

A maioria das argamassas comerciais obteve o coeficiente de absorção por imersão significativamente menor em comparação com as argamassas com adição. Os resultados do ensaio de imersão e o complemento deste ensaio encontram-se no Apêndice I.

5.5 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

5.5.1 Argamassas com Adições

Os resultados do ensaio de absorção por capilaridade podem ser observados da Figura 93 à Figura 95. O ensaio seguiu os procedimentos prescritos pela NBR 9779/95.

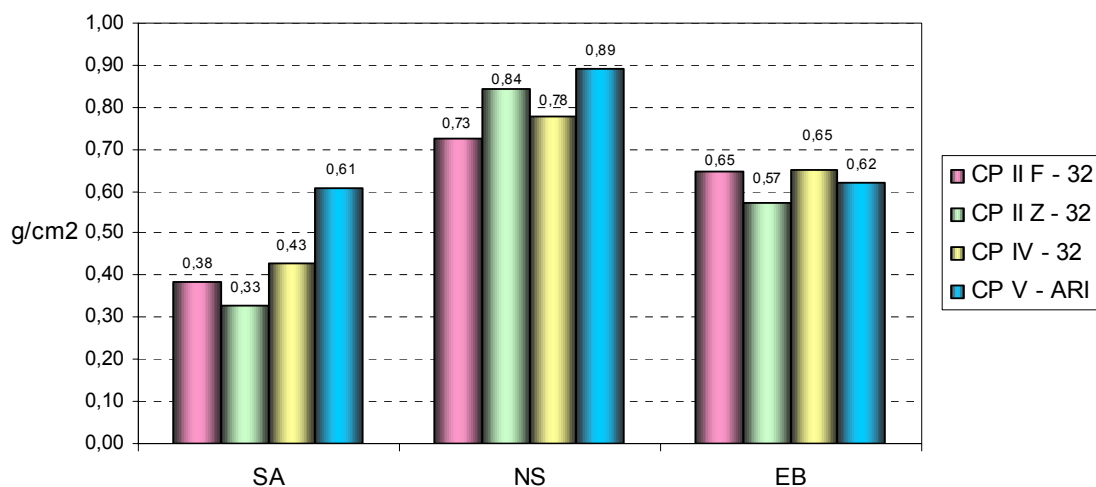


FIGURA 93 - TAXA APC – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – a/c 0,45

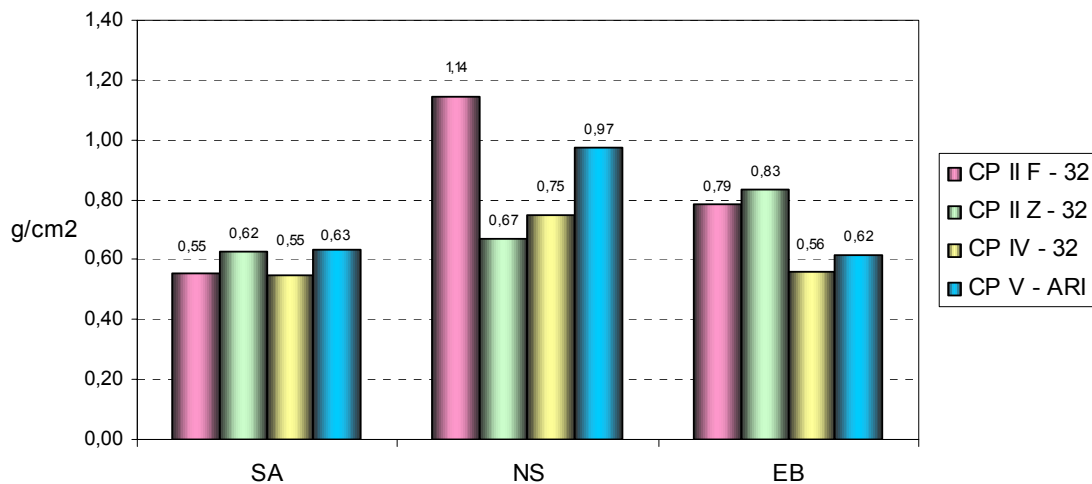


FIGURA 94 - TAXA APC – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – a/c 0,50

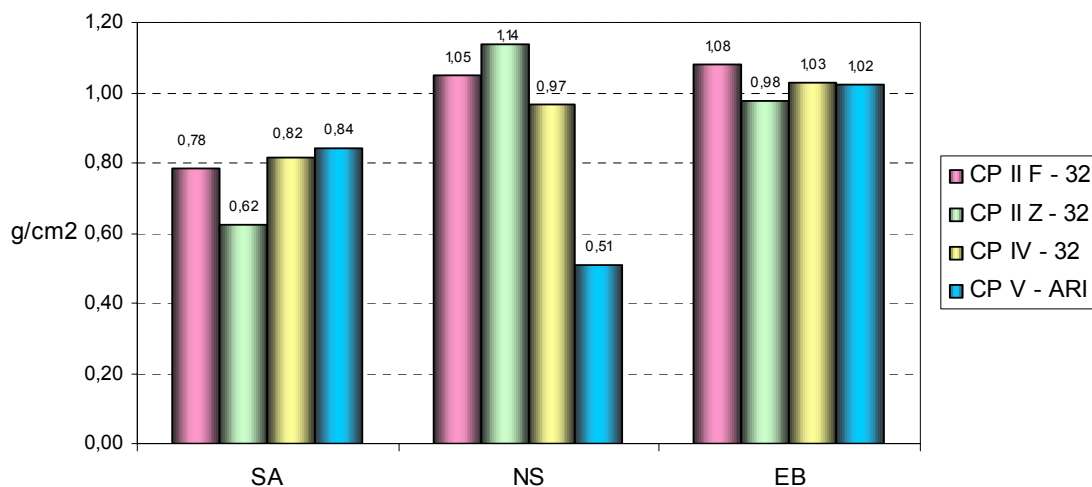


FIGURA 95 - TAXA APC – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – a/c 0,55

Pode ser observado que o menor valor da taxa de absorção por capilaridade é da argamassa com adição de sílica ativa, relação a/c 0,45 e cimento tipo CP II Z - 32. A taxa de absorção para argamassa com adição de nitrito de sódio resultou no segundo melhor desempenho seguido da argamassa com adição de estireno-butadieno. Deve ser lembrado que CABRAL (2000) obteve melhor resultado para argamassa com adição de polímero.

5.5.2 Argamassas Comerciais

Na Figura 96, apresentam-se os resultados obtidos para os ensaios de absorção por capilaridade para as argamassas comerciais.

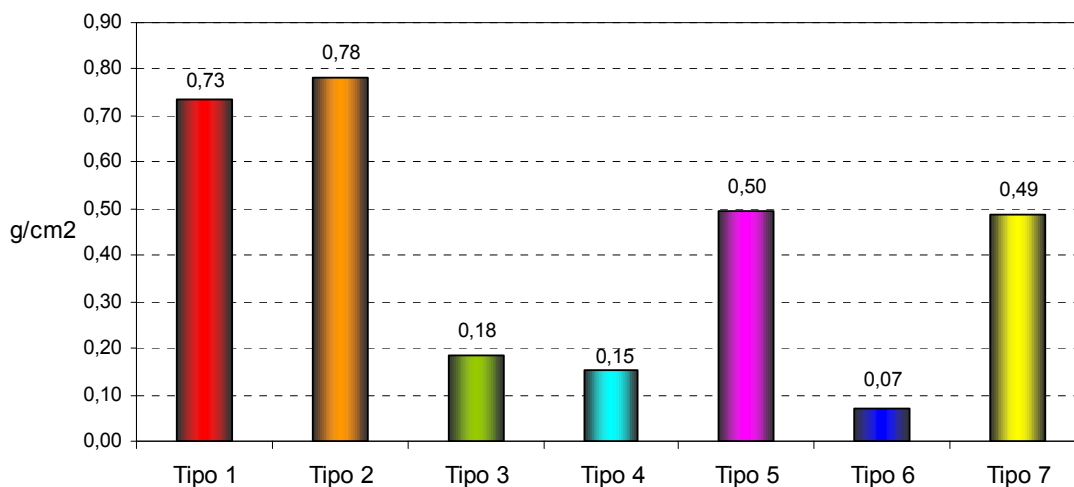


FIGURA 96 - TAXA DE APC – ARGAMASSAS COMERCIAIS

Obteve-se a menor taxa de absorção capilar para a argamassa Tipo 6. Salienta-se o alto desempenho deste material, considerando a taxa de absorção equivalente a $0,07 \text{ g/cm}^2$, ou seja, quase não há absorção capilar nesta argamassa.

5.5.3 Comparação entre Resultados Finais de Absorção por Capilaridade

Alguns dos resultados obtidos para as argamassas comerciais obtiveram melhor desempenho em comparação com as argamassas com adições. Os resultados de absorção por capilaridade podem ser conferidos no Apêndice J. O Apêndice K apresenta a altura da linha de água para três CPs.

5.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

As amostras de argamassas com adição de estireno-butadieno mostraram-se com alta concentração de cálcio, proveniente da formação de portlandita, denominada também como cristais de hidróxidos ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). A Figura 97 mostra um

poro contendo hidróxido de cálcio no seu interior e a Figura 98 comprova a quantidade de cálcio encontrada dentro do poro.

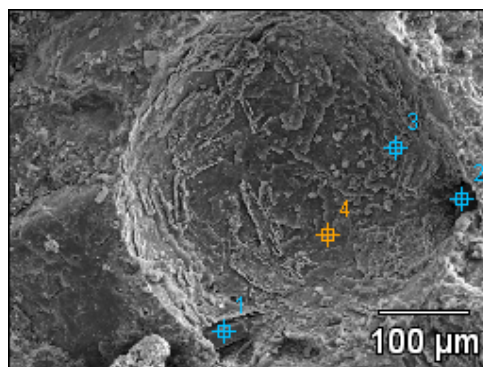


FIGURA 97 - PORO COM HIDRÓXIDO DE CÁLCIO EM ARGAMASSA COM EB

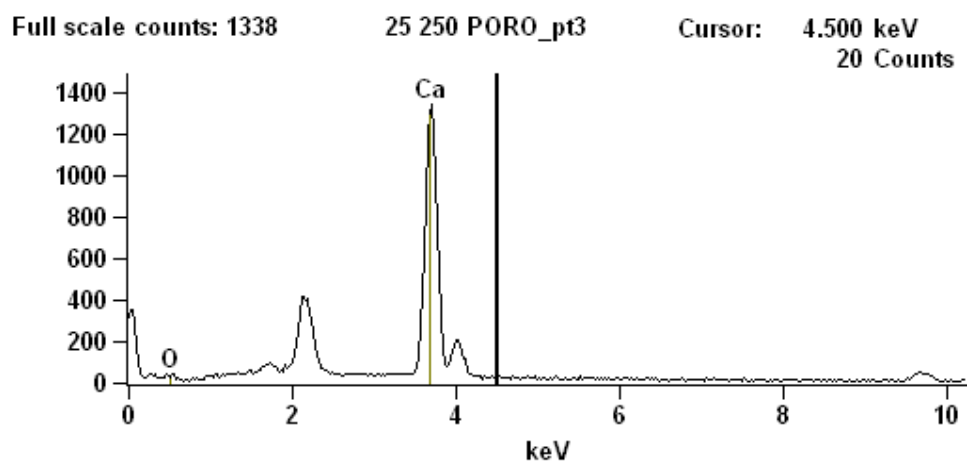


FIGURA 98 - ESPECTRÔMETRO FIG. 97, PONTO 3 – ALTA CONCENTRAÇÃO DE CÁLCIO

A Figura 99 mostra um poro com grandes cristais de Ca(OH)_2 , e a Figura 100 mostra a EDS do ponto 1.

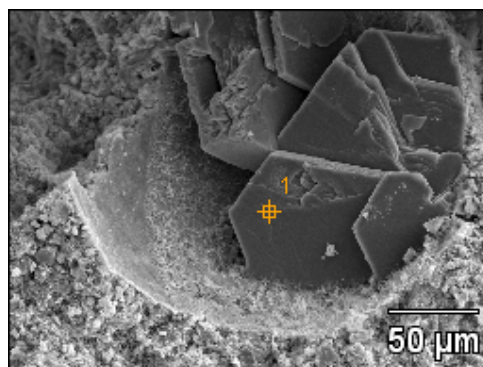


FIGURA 99 - HIDRÓXIDO DE CÁLCIO EM ARGAMASSA COM EB

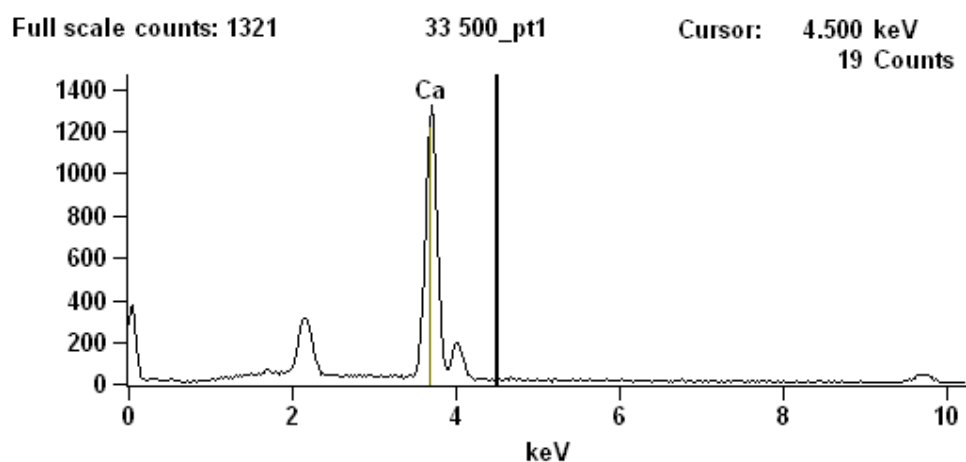


FIGURA 100 - ESPECTRÔMETRO FIG. 99, PONTO 1 – ALTA CONCENTRAÇÃO DE CÁLCIO

A morfologia destes cristais pode variar, principalmente devido ao espaço disponível no interior da pasta de cimento e temperatura de hidratação. A Figura 101 mostra a forma do cristal hexagonal do $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

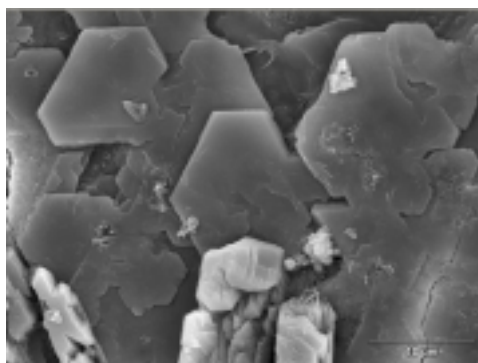


FIGURA 101 - CRISTAIS DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO EM ARGAMASSA COM EB

Quantidades elevadas deste cristal têm efeito desfavorável na argamassa, visto que, se seu volume for acima de 25% na pasta de cimento, o Ca(OH)_2 tende a se solubilizar por ataques químicos. O Apêndice L mostra outras morfologias das argamassas analisadas.

6 CUSTOS

Os materiais de reparo aplicáveis em estruturas de concreto deterioradas são influenciados pela sua maior resistência, durabilidade e permeabilidade, além dos custos que, algumas vezes, podem tornar impraticável sua aplicação.

6.1 VOLUME DE MATERIAL

O volume total de fôrmas utilizadas para a realização de ensaios foi calculado somando-se o volume de cada molde e levando-se em consideração, a massa específica de cada material empregado. Obteve-se assim, o volume total para cada traço, equivalente a 10,06 litros de argamassa.

6.2 PREÇOS DOS MATERIAIS

Conforme a Tabela 29, observam-se os custos de cada material encontrado comercialmente na região de Curitiba, cotados em três fornecedores.

TABELA 29 - PREÇO UNITÁRIO DOS MATERIAIS

MATERIAL	QUANTIDADE	VALOR	UNIDADE	PREÇO UNITÁRIO
Areia Comum	m ³	39,20	kg	0,0002
CP II F - 32	50 kg	22,74	kg	0,45
CP II Z - 32	50 kg	22,74	kg	0,45
CP IV - 32	50 kg	22,74	kg	0,45
CP V - ARI	50 kg	26,66	kg	0,53
Aditivo Superplastificante	27 kg	784,35	kg	29,05
Sílica ativa	15 kg	36,00	kg	2,40
Nitrito de sódio	20 kg	165,80	kg	8,29
Estireno-butadieno	18 kg	78,00	kg	4,33
Argamassa Tipo 1	25 kg	55,00	kg	2,20
Argamassa Tipo 2	40 kg	79,00	kg	1,98
Argamassa Tipo 3	35 kg	161,00	kg	4,60
Argamassa Tipo 4	25 kg	24,00	kg	0,96
Argamassa Tipo 5	25 kg	23,37	kg	0,93
Argamassa Tipo 6	35 kg	89,00	kg	2,54
Argamassa Tipo 7	25 kg	13,00	kg	0,52

O valor da massa específica da areia foi adotado como sendo $2,54 \text{ kg/dm}^3$, e o custo da água foi desconsiderado.

Observa-se que, entre todos os preços unitários, o superplastificante é considerado o material de maior valor. Entre as argamassas comerciais, a argamassa Tipo 3 supera todos os valores da categoria.

6.3 ARGAMASSAS COM ADIÇÕES

As argamassas dosadas com adição de nitrito de sódio ou estireno-butadieno, na maioria das vezes, necessitaram da adição de superplastificante. Dessa forma, foi realizada uma média de consumo por cada relação a/c, conforme indicado da Tabela 30 à Tabela 32.

TABELA 30 - QUANTIDADE MÉDIA DE ADITIVO PARA ADIÇÃO SA

ARGAMASSA COM SA				
a/c	CP II F	CP II Z	CP V	CP IV
0,45		90,67 g		
0,5		56,96 g		
0,55		46,46 g		

TABELA 31 - QUANTIDADE MÉDIA DE ADITIVO PARA ADIÇÃO NS

ARGAMASSA COM NS				
a/c	CP II F	CP II Z	CP V	CP IV
0,45		92,99 g		
0,5		56,60 g		
0,55		23,80 g		

TABELA 32 - QUANTIDADE MÉDIA DE ADITIVO PARA ADIÇÃO EB

ARGAMASSA COM EB				
a/c	CP II F	CP II Z	CP V	CP IV
0,45		100,20 g		
0,5		37,29 g		
0,55		6,26 g		

Com os valores obtidos, pode-se calcular o custo dos materiais para a realização de 1 m^3 de argamassa, conforme Tabela 33 a Tabela 35.

TABELA 33 - CUSTO DOS COMPONENTES DA ARGAMASSA COM SA EM R\$/m³

COMPONENTE	PREÇO UNITÁRIO (kg)	RELAÇÃO a/c		
		0,45	0,50	0,55
AREIA	0,0002	254,65	226,87	222,24
SA	2,40	132,00	117,60	115,20
CP II F - 32	0,45	250,14	222,85	218,30
CP II Z - 32	0,45	250,14	222,85	218,30
CP IV - 32	0,45	250,14	222,85	218,30
CP V - ARI	0,53	293,26	261,27	255,94
ADITIVO	0,03	2,63	1,65	1,35
TOTAL POR TRAÇO (R\$/m ³)				
CP II F, CP II Z e CP IV		639,42	568,97	557,09
CP V		682,54	607,39	594,72

TABELA 34 - CUSTO DOS COMPONENTES DA ARGAMASSA COM NS EM R\$/m³

COMPONENTE	PREÇO UNITÁRIO (kg)	RELAÇÃO a/c		
		0,45	0,50	0,55
AREIA	0,0002	0,24	0,23	0,23
nitrito de sódio	8,29	84,56	82,90	80,91
CP II F - 32	0,45	231,95	227,40	221,94
CP II Z - 32	0,45	227,40	227,40	221,94
CP IV - 32	0,45	227,40	227,40	221,94
CP V - ARI	0,53	271,93	266,60	260,20
ADITIVO	0,03	2,70	1,64	0,69
TOTAL POR TRAÇO (R\$/m ³)				
CP II F, CP II Z e CP IV		319,44	312,17	303,77
CP V		359,42	351,37	342,03

TABELA 35 - CUSTO DOS COMPONENTES DA ARGAMASSA COM EB EM R\$/m³

COMPONENTE	PREÇO UNITÁRIO (kg)	RELAÇÃO a/c		
		0,45	0,50	0,55
AREIA	0,0002	256,96	252,33	245,39
CHAPIX	4,33	481,00	472,33	459,33
CP II F - 32	0,45	252,41	247,87	241,04
CP II Z - 32	0,45	252,41	247,87	241,04
CP IV - 32	0,45	252,41	247,87	241,04
CP V - ARI	0,53	295,93	290,59	282,60
ADITIVO	0,03	2,91	1,08	0,18
TOTAL POR TRAÇO (R\$/m ³)				
CP II F, CP II Z e CP IV		993,28	973,61	945,94
CP V		1036,79	1016,34	987,50

6.4 ARGAMASSAS COMERCIAIS

Os preços das argamassas comerciais foram determinados a partir da quantidade necessária para preencher o volume de $0,0106 \text{ m}^3$, ou seja, 25 kg de material de cada tipo de argamassa. Esta simplificação foi necessária, visto que, as argamassas Tipo 2 e Tipo 5 não apresentaram valores de massa específica pelos seus fabricantes e como as outras argamassas tiveram estes valores semelhantes, optou-se pelo cálculo do custo a partir do volume.

Os valores necessários para 1 m^3 de cada tipo de argamassa comercial, podem ser observados na Tabela 36.

TABELA 36 - CUSTO POR TRAÇO DE ARGAMASSA COMERCIAL EM R\$/m³

Nº. TIPO	kg	PREÇO UNITÁRIO	PREÇO/25 kg	R\$/m ³
1	25	55,00	55,00	5225,00
2	40	79,00	49,38	4661,00
3	35	161,00	115,00	10948,00
4	25	24,00	24,00	2280,00
5	25	23,37	23,37	2220,15
6	35	89,00	63,57	6052,00
7	25	13,00	13,00	1235,00

6.5 RESULTADOS

6.5.1 Argamassas com Adições

Para argamassas com adição de sílica ativa, estireno-butadieno e nitrato de sódio foram obtidos valores para cada relação a/c e tipo de cimento, conforme mostrado na Figura 102, Figura 103 e Figura 104.

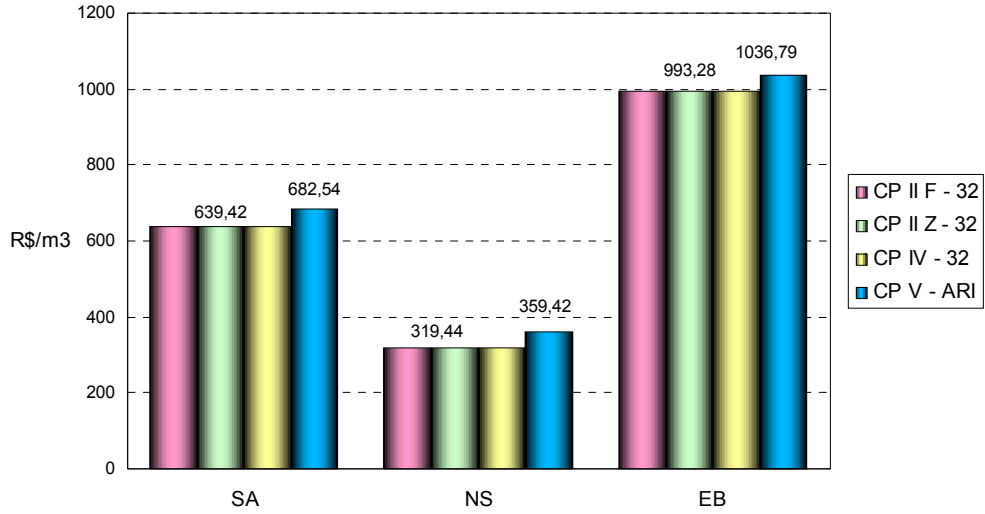


FIGURA 102 - CUSTO EM R\$/m³ – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,45

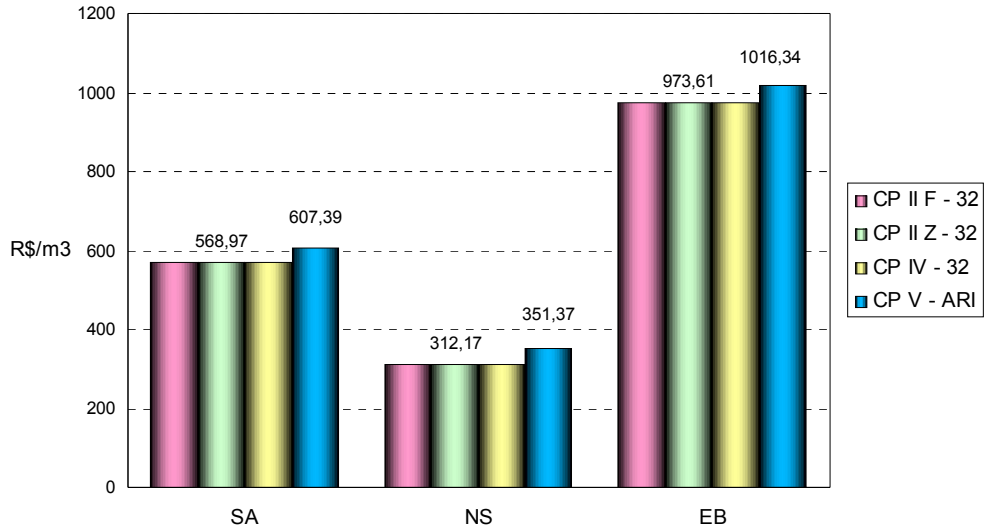


FIGURA 103 - CUSTO EM R\$/m³ – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,50

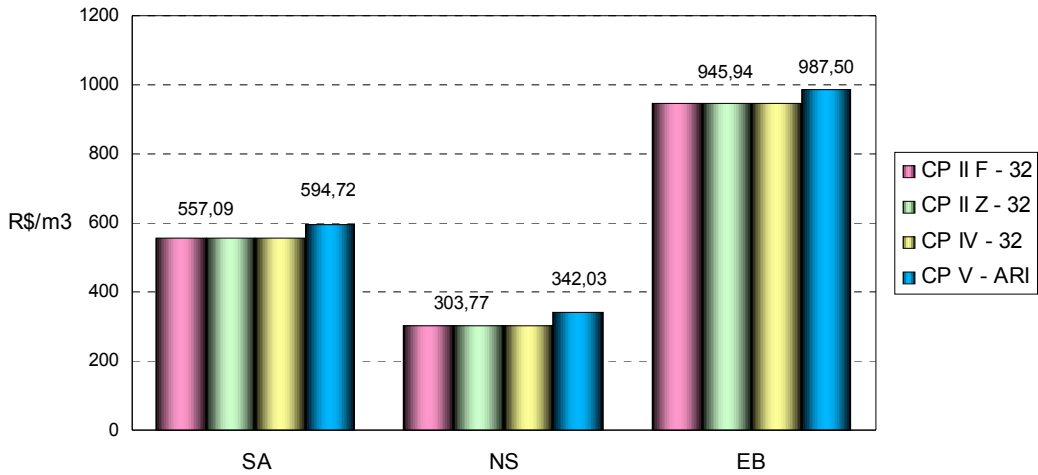


FIGURA 104 - CUSTO EM R\$/m³ – ARGAMASSAS COM ADIÇÕES – A/C 0,55

Pode-se observar que, independente do tipo de cimento ou relação a/c, os custos obtidos para argamassas com adições de nitrito de sódio foram os menores, enquanto que para as argamassas com adição de estireno-butadieno, os custos se apresentaram mais elevados.

Para as diferentes relações a/c, observa-se que os custos aumentam quando a relação a/c diminui, indicando maior consumo de cimento.

As porcentagens das adições e o preço das mesmas podem ser considerados como o principal fator para a variação dos custos de cada traço de argamassa.

6.5.2 Argamassas Comerciais

Os custos das argamassas comerciais são mostrados na Figura 105.

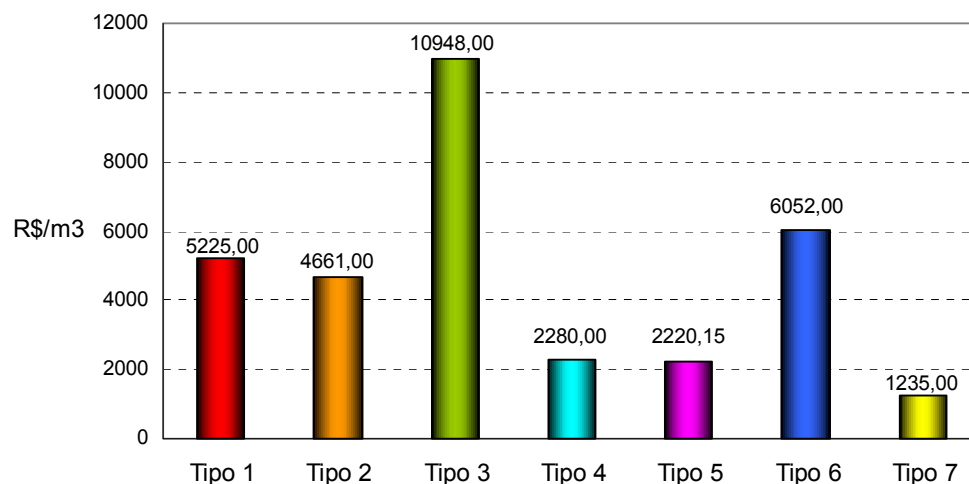


FIGURA 105 - CUSTO EM R\$/m³ – ARGAMASSAS COMERCIAIS

Observa-se que o custo da argamassa Tipo 3 é discrepante em relação aos outros tipos de argamassas. Já a argamassa Tipo 7, se mostra como o menor custo.

6.6 AVALIAÇÃO FINAL

Em relação às adições, o nitrito de sódio mostrou-se como a adição de menor custo, enquanto a sílica ativa teve seu preço superado pelo estireno-butadieno.

Os custos das argamassas comerciais indicaram valores muito superiores às argamassas com adições.

Dentre as argamassas comerciais, a Tipo 7 apresentou o menor custo, enquanto que a argamassa Tipo 3 mostrou-se como a de maior custo.

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM CÂMARAS E CAIXAS

Conforme observado no Capítulo 3, as estruturas subterrâneas de câmaras inspecionadas sofreram maior incidência de manifestações patológicas relacionadas à corrosão, carbonatação, fissuras e destacamento de concreto, acompanhados de armaduras expostas de elementos estruturais.

As caixas de passagem apresentaram maior quantidade de armaduras expostas com corrosão, assim como grandes espessuras de carbonatação, indicada pela redução da alcalinidade do concreto.

A localização destas estruturas em meio urbano, sob ação da emissão de poluentes por veículos, faz com que sofram com o elevado teor de substâncias ácidas, como o CO_2 , pois estas promovem a despassivação da armadura por carbonatação.

A carbonatação e outras manifestações patológicas encontradas são decorrentes de fatores que, em conjunto, agredem as estruturas de concreto armado. Elevada temperatura, umidade excessiva e presença de oxigênio são as condições responsáveis pela formação da corrosão.

A qualidade do concreto deve ser questionada, pois as estruturas, na maioria pré-moldadas, deveriam possuir maior controle de qualidade em sua produção. Fatores como relação a/c, espessura de cobrimento, tipo de cimento, entre outros, ora não são especificados nos projetos, ora especificados erroneamente, além de não serem respeitados na execução de obras subterrâneas.

O fato das caixas de passagem não possuírem bombas de recalque no seu interior permite que estas fiquem com água acumulada a maior parte do tempo. O nível de água acumulada, quase sempre abaixo do nível da tampa, faz com que a umidade se condense na parte inferior desta, e juntamente com a presença de O_2 e

CO₂, promovem a corrosão acelerada de armaduras. A parte da estrutura que se encontra submersa está saturada, impedindo que haja penetração de gases catalisadores do processo de corrosão.

As câmaras sofrem o mesmo processo de corrosão acentuado pela alta temperatura gerada pelo transformador, que aliada à falta de cobrimento, estimulam a solubilidade de substâncias encontradas nos poros não saturados.

Para melhor avaliação das patologias nas câmaras e caixas subterrâneas é necessário realizar ensaios referentes à corrosão. A compreensão de dados obtidos pelos ensaios de concreto, assim como a indicação dos agentes agressivos no solo e na água que circunda a estrutura, não demonstraram maiores influências pelo ataque por cloretos, sulfatos e pH. A própria resistência à compressão axial de testemunhos de concreto se mostrou elevada.

Com relação ao levantamento e ensaios realizados nos testemunhos, pode-se constatar que as estruturas necessitam reparos somente em elementos isolados, como vigas e tampas, sem a necessidade de substituir ou recuperar a peça por inteiro.

Qualificando e quantificando as manifestações patológicas, pode-se estudar e avaliar tais estruturas, prevendo reparos para estagnar ou desacelerar o processo de deterioração de estruturas de concreto inseridas em ambientes agressivos, bem como aprimorar as estruturas que se encontram em situação similar às estudadas neste projeto.

7.2 SISTEMAS DE REPAROS

O objetivo do estudo de sistema de reparos foi caracterizar propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas com adição de sílica ativa, polímero à base de estireno-butadieno e nitrito de sódio, bem como de argamassas comerciais encontradas na região de Curitiba.

Foram analisadas as propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão) e durabilidade (absorção por sucção capilar, absorção por imersão e capilaridade) de argamassas com adição de sílica ativa, polímero à base de estireno-butadieno e nitrito de sódio, bem como argamassas comerciais encontradas na região metropolitana de Curitiba.

Considerando-se as características como relação a/c, idade, tipo do cimento e adições, pode-se analisar a correta aplicação das argamassas em reparo de elementos estruturais, de câmaras e caixas subterrâneas.

7.2.1 Ensaio de Resistência à Compressão Axial

A taxa de crescimento da resistência é influenciada pela relação a/c, onde o menor valor, independente do tipo de cimento ou idade, se mostrou superior com adição de sílica ativa na mistura. Observou-se também a eficácia da dosagem realizada com cimento CP IV - 32, adição de sílica ativa e relação a/c 0,45, no entanto, seu custo foi superior ao das outras adições.

A argamassa Tipo 4 (graute não-retrátil) apresentou maior resistência à compressão, com custo relativamente baixo em relação às outras argamassas comerciais.

7.2.2 Ensaio de Resistência à Tração na Flexão

Observou-se que a argamassa com adição de sílica ativa, relação a/c 0,45 e cimento CP IV – 32, atingiu o máximo valor de resistência à tração na flexão. O alto teor de pozolanas encontrado neste cimento proporciona o preenchimento de vazios capilares e poros, potencializando a resistência da argamassa. O custo desta argamassa pode ser considerado moderado em relação aos demais.

A argamassa Tipo 4 apresentou valores significativamente superiores às outras argamassas comercializadas.

7.2.3 Ensaio de Absorção por Sucção Capilar – Absortividade

A utilização do cimento CP IV - 32 aliado à adição de sílica ativa com relação a/c 0,45, apresentou maior resistência capilar bem como a menor taxa de absorção. Seu custo é considerado moderado em relação às outras adições.

A argamassa Tipo 7 (argamassa de altas resistências inicial e final) apresentou a maior resistência capilar e a argamassa Tipo 6 (argamassa polimérica), a menor taxa de absorção. Pode ser observado que a argamassa que apresentou a maior resistência capilar não foi a que apresentou menor taxa de absorção.

7.2.4 Ensaio de Absorção por Imersão

Os melhores resultados obtidos foram para as argamassas com sílica ativa e cimento CP IV - 32 e relação a/c 0,45. O custo desta argamassa pode ser considerado moderado, visto que possui o menor coeficiente de absorção.

A argamassa Tipo 6 apresentou menor coeficiente de absorção, porém seu custo é elevado em relação às demais argamassas comerciais.

7.2.5 Ensaio de Absorção por Capilaridade

A menor taxa de absorção capilar foi obtida para a argamassa com adição de sílica ativa, cimento CP II Z - 32 e relação a/c 0,45. O custo desta argamassa pode ser considerado moderado em relação às demais argamassas de reparo.

A argamassa Tipo 6 apresentou a menor taxa de absorção, resultando em $0,07 \text{ g/cm}^2$, porém seu custo é elevado.

7.2.6 Conclusão

Diante das considerações dos ensaios realizados em argamassas com adições, pode-se concluir que a argamassa com adição de sílica ativa, cimento CP IV - 32 e relação a/c 0,45 é o traço ideal para a realização de reparos, onde são

necessários maiores resistências e menor permeabilidade, apesar desta argamassa não apresentar o menor custo.

Considerando-se os ensaios de resistência mecânica, entre as argamassas comerciais, a argamassa Tipo 4 apresentou melhor desempenho e menor custo. Levando-se em consideração os ensaios de durabilidade, a argamassa Tipo 6 apresentou melhor desempenho, contudo seu custo é elevado.

7.3 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para dar prosseguimento ao estudo de sistemas de reparo eficazes em estruturas de concreto subterrâneas, sujeitas às ações de agentes agressivos, são sugeridos os seguintes temas:

- caracterização de parâmetros que influenciam o processo de corrosão por despassivação de armaduras em estruturas subterrâneas;
- realização de ensaios comparativos de difusão e migração de íons cloretos, bem como carbonatação acelerada e natural de argamassas de reparo;
- estudo do ataques por microorganismos, por ensaios em solos, água e concreto de estruturas subterrâneas;
- cadastro e comparação de estruturas subterrâneas deterioradas em outras regiões do Brasil;
- análise e previsão de vida útil de caixas e câmaras subterrâneas novas e em estado avançado de degradação;
- estudo de sistemas construtivos pré-moldados, visando implementação otimizada e durabilidade;
- dosagem de sistemas de reparos com argamassas de menor relação a/c, diferentes adições e aditivos, bem como concretos de alto desempenho (CAD);

- monitoração por meio de instrumentação de parâmetros como temperatura, umidade, fissuras, deslocamentos, gases, nível d'água, e suas interações com as estruturas de concreto subterrâneas;
- realização de ensaios complementares à corrosão de armaduras como resistência elétrica e de polarização, potenciais de corrosão, impedância e ruído eletroquímico;
- aplicação de reparos em estruturas subterrâneas para posterior avaliação do desempenho mecânico e durabilidade;
- desenvolver um manual de reparos em função da avaliação do desempenho dos mesmos em estruturas de concreto subterrâneas.

BIBLIOGRAFIA

ABREU, A. G. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. Dissertação de mestrado. Porto Alegre 1998. 142 p.

AGUIAR, J. E. Patologias que comprometem a durabilidade do concreto em galerias de águas pluviais. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 42º, 2000, Fortaleza. **Anais em CD-ROM do 42º IBRACON**. Fortaleza: IBRACON, III-A-012.

AHMAD, S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review. **Cement & Concrete Composites**, 25. 2003.

AÍTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Pini. 2000. 667p.

AL-AMOUNDI, O. S. B. Attack on Plain and Blended Cements Exposed to Aggressive Sulfate Environments. **Cement and Concrete Composites**, n. 24, 2002. p. 315-316.

AL-BAHAR, S.; ATTIOGBE, E. K.; KAMAL, H. Investigation of Corrosion Damage in Reinforced Concrete Structure in Kuwait. **ACI Materials Journal**. May-June 1998.

ANDRADE, J., DAL MOLIN D. Influência da Agressividade Ambiental nas Patologias em Estruturas de Concreto Armado nas Cidades de Porto Alegre (RS) e Recife (PE). Durabilidade das Construções. São Leopoldo – RS. **Anais ANTAC**, 1997. p. 127 – 133.

ANDRADE, P. M. C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. 1. ed. Pini. São Paulo: 1992. 104p.

ANDRIOLO, R. R., SGARBOZA, B. C. **Inspeção e controle de qualidade do concreto**. 1. ed. São Paulo: Newswork. 1993. 572 p.

ARANHA, P. M. S. **Contribuição ao estudo de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica**. Dissertação de mestrado. Porto Alegre. 1994. 144 p.

ASHTON, H. E.; SEREDA, P. J. Environment, Microenvironment and Durability of Building Materials. **Durability of Building Materials**, V1. 1982. p. 49-65.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, Abril. 1994.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, Agosto. 2003.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 7219:** Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 7251:** Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 7680:** Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de concreto armado. Rio de Janeiro, Janeiro.1983.

_____. **NBR 9776:** Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, Janeiro. 1987.

_____. **NBR 9777:** Agregados - Determinação da absorção de água em agregados miúdos
Rio de Janeiro, Janeiro. 1987.

_____. **NBR 9778:** Cimento Portland - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, Março.1987.

_____. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, Abril. 1995.

_____. **NBR 12142:** Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão, em corpos-de-prova prismáticos. Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação da consistência. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, Abril. 1995.

_____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, Abril 2003.

BAI, J; WILD, S.; SABIR, B.B. **Sorptivity and strength of air-cured and water-cured PC–PFA–MK.** Concrete and the influence of binder composition on carbonation depth. 2002.

BARBOSA, W.; WOZNIAK, R.S; MEDEIROS, B.L.; PEDROZO, P.H; FERNANDES, M.; CARMO, J.B.M. **Análise do concreto de estrutura das câmaras transformadoras subterrâneas sob a ação de ambiente agressivo.** Congresso Betão estrutural 2004. Cidade do Porto – Portugal.

BAUER, F. L.A. **Materiais de Construção.** 1 ed. LTC. São Paulo: 1994.

BENAZZOUK, A.; DOUZANE, O.; QUÉNEUDEK, M. Transport of fluids in cement–rubber composites. **Cement & Concrete Composites**, 26, 21–29p. 2004.

CABRAL, A. E. B. **Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço induzida por cloretos.** Dissertação de mestrado. Porto Alegre, 2000.

CÁNOVAS, M. **Patologia e Terapia do Concreto armado**. 1 ed. São Paulo: Pini, 1988. 522p.

CARVALHO, R.C.; JURLAN JÚNIOR, S.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. de; MAREGA, W. T.; COSTA, M. H. Recuperação de dois reservatórios enterrados. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 42º, 2000, Fortaleza. **Anais em CD-ROM do 42º IBRACON**. Fortaleza: IBRACON, III-E-005.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto. Inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1. ed. São Paulo: Pini. 1997. 237p.

CEUKELAIRE, L, VAN NIEUWENBURG, D. **Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concret**. 1992.

CINCOTTO, M.A. Ação do Meio Sobre o Concreto. Durabilidade das Construções. São Leopoldo – RS. **Anais ANTAC**, 1997.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação de mestrado. Porto Alegre. 1988. 196 p.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3 ed. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro: 1996. 345p.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa**. Dissertação de mestrado. 1999. 257p.

HELENE, P. **Manual para Reparos, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto**. 2. ed. Sao Paulo: Pini, 1992. 213p.

JUNG, W.; YOON, Y.; SOHN,Y. **Predicting the remaining service life of land concrete by steel corrosion**. 2002.

KELHAM, S. A water absorption test for concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 40, n. 143, p. 106-110, June 1988.

KLEIN, D. L.; CAMPAGNOLO, J. L.; SILVA, L.C. **Patologias das edificações**. Curso UFRGS. 1999.

KORMANN, A. C. M. **Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens**. Dissertação de mestrado. Curitiba, 2002. 213 p.

KULAKOWSKI, M. **Argamassa com adição de microssílica para reparos estruturais: estudo da penetração de cloretos**. Dissertação de mestrado. Porto Alegre. 1994. 106 p.

KULAKOWSKI, M. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. Tese de Doutorado. Porto Alegre, 2002. 180p.

MACIEL, A. da S. **Análise experimental de vigas armadas de concreto de alto desempenho com diferentes tipos de fibras**. Rio de Janeiro, 2001. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

MAILVAGANAM, N.P. **Repair and Protection of Concrete Structures**. Institute for Research in Construction. National Research Council of Canada. Ottawa, Ontario, 1992.

MARTYS, S. N. e FERRARIS E. C. Capillary transport in mortars and concrete. **Cement and Concrete Research**, Vol. 27, No. 5, pp. 747-760, 1997.

MATHER, B. Concrete durability. **Cement & Concrete Composites**, 26. 3–4p. 2004

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994. 580p.

NEVILLE, A. **Propriedades do Concreto**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997. 828p.

ODIGURE, J. O. Deterioration of long-serving cement-based sandcrete structures in Nigeria. **Cement and Concrete Research**, 32. 2002. 1451–1455.

PADILHA, F. A., AMBROZIO, F. F. **Técnicas de análise microestutural**. 1. ed. São Paulo: Hemus. 1985.

PALERMO, G. **Concreto Projetado como Revestimento de Túneis**. Dissertação de mestrado. São Paulo, 1997.

PARANÁ. Governador (1999-2002 - Lerner). **Relatório de Qualidade do Ar na Região Metropolitana de Curitiba**. Curitiba, 2001.

SABBAG, F. A. **Verificação da existência de reação álcali-agregado no concreto da uhe de mascarenhas**. Dissertação de mestrado. 2003. 119 p.

SHAHIN, U. M.; HOLSEN, T.; ODABASI, M. Dry deposition measured with a water surface sampler: a comparison to modeled results. **Atmospheric Environment**, 36. 2002. 3267–3276

SILVA, P. F. A. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1995.

SOUZA, V.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998. 253p.

SUJJAVANICH, S. et al. Development of Strength and Fracture Properties of Styrene-Butadiene Copolymer Latex-Modified Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 2, 1998. p. 131-143.

THOMAZ, E. **Trincas em Edifícios – causas, prevenção e recuperação**. 1 ed. São Paulo: Pini, 2000. 194 p.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado – mapeamento de agregados reativo do Estado de São Paulo**. Dissertação de mestrado. Campinas, 2002. 213p.

ZIVICA, V.; BAJZA, A. Acidic Attack of Cement-Based Materials – A Review. Part 1: Principles of Acidic Attack. **Construction and Building Materials**. n. 15, 2001. p. 331-340.